



อิทธิพลของแสงจากหลอดแอลอีดีต่อการเจริญเติบโต และการผลิต
เมล็ดพันธุ์ของต้นพืทุเนียในระบบกึ่งปิด



ทิวา จามะรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาสหวิทยาการเกษตร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

อิทธิพลของแสงจากหลอดแอลอีดีต่อการเจริญเติบโต และการผลิต
เมล็ดพันธุ์ของต้นพิทูเนียในระบบกึ่งปิด

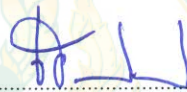
ทิวา จามะรี

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสหวิทยาการเกษตร

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริวัฒน์ สาครวาสี)

วันที่ 30 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2560

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม



(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จิตวงศ์ลำเลิศ)

วันที่ 30 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2560

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม



(อาจารย์ ดร.ปารวี กาญจนประโชติ)

วันที่ 30 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2560

ประธานอาจารย์ประจำหลักสูตร



(ศาสตราจารย์ ดร.ศิริวัฒน์ วงษ์ศิริ)

วันที่ 30 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2560

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 30 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2560

ชื่อเรื่อง	อิทธิพลของแสงจากหลอดแอลอีดีต่อการเจริญเติบโตและการผลิตเมล็ดพันธุ์ของต้นพิทูเนียในระบบกึ่งปิด
ชื่อผู้เขียน	นายทิวา จามะรี
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสหวิทยาการเกษตร
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริวัฒน์ สาครวาสี

บทคัดย่อ

พิทูเนีย เป็นไม้ดอกล้มลุกหลายฤดู โดยปกติการผลิตเมล็ดพันธุ์พิทูเนียในประเทศไทยสามารถผลิตได้โดยเฉลี่ยปีละ 1 รอบเท่านั้น เนื่องจากสภาพแวดล้อมไม่เอื้ออำนวยต่อการปลูก อีกทั้งยังประสบปัญหาการแพร่ระบาดของโรคจากไวรัสใบยาสูบต่าง ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์ ระบบปลูกพืชแบบกึ่งปิดในสภาวะที่มีการควบคุมปัจจัยแวดล้อมภายใต้แสงเทียมเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ จึงทำการศึกษาอิทธิพลของคุณภาพแสง ความเข้มแสง และช่วงแสงต่อการเจริญเติบโต และการผลิตเมล็ดพันธุ์ของต้นพิทูเนียในระบบกึ่งปิด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แสงจากหลอดไฟ LED (Light Emitting Diode) สีขาวทุกตำรับ มีช่วงความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงินที่เหมือนกัน ในขณะที่ช่วงความยาวคลื่นแสงสีอื่น ๆ จะมีความแตกต่างกันตามชนิดของชิปเปล่งแสง ในการศึกษาอิทธิพลของช่วงแสงทำการทดลองโดยให้ช่วงแสง 3 ระดับ ได้แก่ 8 12 และ 16 ชั่วโมงต่อวัน พบว่า การได้รับช่วงแสง 16 ชั่วโมงต่อวัน ส่งผลให้ต้นพิทูเนียมีการเจริญเติบโตมากที่สุด อีกทั้งสามารถกระตุ้นการออกดอกได้ไว มีจำนวนดอกต่อต้น การติดฝัก จำนวนเมล็ดต่อฝัก และเมล็ดต่อต้นสูงอีกด้วย นอกจากนี้การศึกษอิทธิพลของคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ตำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB โดยแบ่งความเข้มแสงเป็นสองระดับ คือ 150 และ 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ พบว่า การให้แสง 3200 K และ 6500 K : 3200 K ที่ความเข้มแสง 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ส่งผลให้ต้นพิทูเนียมีการเจริญเติบโตมากที่สุดและทำให้การออกดอก การติดฝัก ผลผลิตเมล็ดพันธุ์ต่อต้นสูง อีกทั้งเมล็ดยังมีคุณภาพที่สูงกว่าเมล็ดที่ผลิตโดยบริษัท เอ เอฟ เอ็ม ฟลาวเวอร์ ซีดส์ จำกัด ประเทศไทย (AFM) โดยวิธีการแบบดั้งเดิม

Title	THE EFFECT OF LED LIGHT ON GROWTH AND SEED PRODUCTION OF PETUNIA UNDER SEMI-CLOSED PLANT PRODUCTION SYSTEM
Author	Mr. Thiva Jamaree
Degree	Master of Science in Agricultural Interdisciplinary
Advisor Committee chairperson	Assistant Professor Dr. Siriwat Sakhonwasee

ABSTRACT

Petunia is an herbaceous perennial flowering plant. Normally, Petunia seed production in Thailand can only be done once a year because of unsuitable conditions and outbreak of diseases which negatively affects the quality of the petunia seeds. Using of semi-closed plant production system with artificial light in which environmental factors can be controlled is an alternative cultivation system that could solve these problems. Therefore, this research studied the influence of light quality, light intensity and photoperiod on growth and seed production of petunia under semi-closed system. The results showed that all white LEDs have a similar wavelength of blue light, while other light colors are different in wavelength depending on types of LED chip. In light photoperiods experiments, three levels of photoperiods were used, namely, 16/8 (Light/Drak), 12/12 and 8/16. It was found that petunia plants exposed to 16/8 has the highest growth. Moreover, 16/8 can also induce rapid flowering, high number of flowers, high number of pods and high number of seeds per plant. In light quality experiment, Petunia were grown under 4 different light qualities which are 6500 K, 3200 K, 6500 K : 3200 K and RB under two light intensities, namely 150 and 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Overall it was found that Petunia grown under 3200 K and 6500 K : 3200 K at 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ exhibited the highest growth with higher number of flowers, number of pods and number of seeds per plant than other treatments. In addition, Seeds of 3200 K and 6500 K : 3200 K at 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ were of higher quality than those conventionally produced by AFM Flower Seed (Thailand) Co., Ltd.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริวัฒน์ สาครวาสี รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ และอาจารย์ ดร.ปารวี กาญจนประโชติ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการศึกษาวิจัย ทั้งในเรื่องของการค้นคว้าข้อมูล การวางแผนการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูล ตลอดจนการเขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์จนกระทั่งสำเร็จ

ขอขอบคุณสาขาสหวิทยาการเกษตร คณะบัณฑิตวิทยาลัย และสาขาพืชผัก คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท เอ เอฟ เอ็ม ฟลาวเวอร์ ซีตส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เมล็ดพันธุ์พืชเพื่อใช้ในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบิดา และมารดาที่ให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนการศึกษามาตลอดเวลา ทั้งในด้านทุนการศึกษา สถานที่พัก ยานพาหนะในการเดินทาง กำลังใจ และคำปรึกษา อีกทั้งเปิดโอกาสให้มีอิสระทางความคิดทั้งในเรื่องของการดำเนินชีวิต และการศึกษา ซึ่งสิ่งเหล่านี้ ส่งผลให้ข้าพเจ้ามีความมุ่งมั่น และตั้งใจทำหน้าที่ของตน จนกระทั่งสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้ได้ด้วยดี

ทิวา จามะรี
ตุลาคม 2560

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
ABSTRACT	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(9)
สารบัญภาพ	(11)
บทที่ 1 บทนำ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	4
ข้อมูลทางพฤกษศาสตร์ของพืชน้ำ	4
คุณสมบัติของแสง	6
แหล่งกำเนิดแสงเทียม ประเภทหลอด LED	7
ความคุ้มค่าของการปลูกพืชภายใต้แสงเทียมประเภท LED	10
การสังเคราะห์แสงของพืช	11
คุณภาพแสง ความเข้มแสง และช่วงแสง ต่อการเจริญเติบโตของพืช	12
อิทธิพลของแสงเทียมต่อการพัฒนาและการเจริญเติบโตของพืชน้ำ	15
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	18
การเตรียมพืชทดลอง	18
การทดลองที่ 1 การตรวจวัดคุณภาพแสงเชิงสเปกตรัมของหลอด LED	18
การทดลองที่ 2 อิทธิพลของช่วงแสงจากหลอด LED ต่อการเจริญเติบโตของต้นพืชน้ำ	20
การทดลองที่ 3 อิทธิพลของคุณภาพ และความเข้มแสงจากหลอด LED ต่อการเจริญเติบโตของต้นพืชน้ำ	22
การทดลองที่ 4 อิทธิพลของคุณภาพแสง ต่อการเจริญเติบโต การออกดอก การให้ผลผลิต และคุณภาพเมล็ดพันธุ์ของต้นพืชน้ำ	23

	หน้า
การวัดระดับมาลอนไดอัลดีไฮด์ (Malondialdehyde content; MDA)	24
การวัดปริมาณคลอโรฟิลล์	24
การวัดเปอร์เซ็นต์ความงอก และความมีชีวิตของเรณู	25
การวัดเปอร์เซ็นต์ความงอกของเมล็ด และค่าเฉลี่ยจำนวนวันที่ใช้ในการงอก	25
การวัดความแข็งแรง และความชื้นของเมล็ด	26
การวัดปริมาณโปรตีนในเมล็ด	27
การวัดดัชนีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแลกเปลี่ยนก๊าซ	27
การวัดค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการเรืองแสงของคลอโรฟิลล์	27
การวัดประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสง (Energy use efficiency; EUE)	28
การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ	28
สถานที่ดำเนินงานวิจัย	29
ระยะเวลาในการวิจัย	29
บทที่ 4 ผลการทดลอง	30
การทดลองที่ 1 การตรวจวัดคุณภาพแสงเชิงสเปกตรัมของหลอด LED	30
การทดลองที่ 2 อิทธิพลของช่วงแสงจากหลอด LED ต่อการเจริญเติบโตของต้นพืชน้ำ	34
การทดลองที่ 3 อิทธิพลของคุณภาพ และความเข้มแสงจากหลอด LED ต่อการเจริญเติบโตของต้นพืชน้ำ	54
การทดลองที่ 4 อิทธิพลของคุณภาพแสง ต่อการเจริญเติบโต การออกดอก การให้ผลผลิต และคุณภาพเมล็ดพันธุ์ของต้นพืชน้ำ	70
บทที่ 5 วิจัย และสรุปผลการทดลอง	84
คุณภาพแสงเชิงสเปกตรัมของหลอดแอลอีดี	84
อิทธิพลของช่วงแสงจากหลอดแอลอีดีต่อการเจริญเติบโตของต้นพืชน้ำ	85
อิทธิพลของคุณภาพ และความเข้มแสงจากหลอดแอลอีดีต่อการเจริญเติบโตของต้นพืชน้ำ	87
อิทธิพลของคุณภาพแสง ต่อการเจริญเติบโต การออกดอก การให้ผลผลิต และคุณภาพเมล็ดพันธุ์ของต้นพืชน้ำ	89
สรุปผลการทดลอง	91

	หน้า
ข้อเสนอแนะ	91
บรรณานุกรม	93
ภาคผนวก	103
ภาคผนวก ก ประวัติผู้วิจัย	104



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ส่วนประกอบของธาตุอาหารในสารละลายปุ๋ย Modified Hoagland	19
2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวของค่าจุดสูงสุดของเส้นกราฟของแสง LED ในลูกคลื่นที่ 1 และ 2 ของทั้ง 4 ดำรับ	32
3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวของค่าร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของแสง LED ทั้ง 4 ดำรับ	32
4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวของค่าร้อยละของ PAR ทั้ง 4 ดำรับ	33
5	การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวของความกว้าง และความสูงของทรงพุ่ม จำนวนใบ พื้นที่ใบ และจำนวนยอดของต้นพื้ญญที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด	36
6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวของช่วงแสง (A) อายุพืช (B) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกสองทางของช่วงแสงกับอายุพืช (A x B) ที่มีผลต่อมวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น (n=4)	36
7	ความหนาใบ และความยาวของเซลล์พาลิเสด และสปันจ์ของใบพื้ญญที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด	38
8	การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวของช่วงแสง (A) และอายุพืช (B) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกสองทางของปฏิสัมพันธ์ระหว่างช่วงแสงกับอายุพืช (A x B) ที่มีผลต่อความกว้าง ความสูง และค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซทั้งที่ทำการตรวจวัดเป็นค่าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ใบ ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) และค่าผลรวมต่อวัน ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	47
9	การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวของค่าความชันของเส้นแนวโน้ม และ R^2 ของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง ($50\text{-}200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) กับค่าอัตราการสังเคราะห์แสงภายใต้คุณภาพแสงทั้ง 4 ดำรับ	56
10	การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของคุณภาพแสง และความเข้มแสง (พื้นที่สี่เท่าในภาพที่ 23; $50\text{-}200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงในการตรึง CO_2 (Quanta/ CO_2 uptake)	57

ตารางที่		หน้า
11	การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของคุณภาพแสง และความเข้มแสง (พื้นที่สีขาวในภาพที่ 23 ; $200-1000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงในการตรึง CO_2 (Quanta/ CO_2 uptake)	57
12	การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว สองทาง และสามทางของ อายุพืช (A) คุณภาพแสง (B) และความเข้มแสง (C) ที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซ และประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII	66
13	วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว และสองทางของคุณภาพแสง (A) และความเข้มแสง (B) ที่มีผลต่อมวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น มวลน้ำหนักแห้งราก สัดส่วนมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้นต่อมวลน้ำหนักแห้งส่วนราก และประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงเพื่อการเจริญเติบโตทางลำต้น และใบ (EUE for plant growth)	68
14	สรุปผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบ Pearson ระหว่างคุณภาพแสงกับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต การออกดอก และการติดฝัก	81
15	สรุปผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบ Pearson ระหว่างคุณภาพแสงกับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับผลผลิตเมล็ด และคุณภาพเมล็ด	82

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะต้นพื้ทุเนียที่มีดอกสีม่วง	4
2	แสดงลักษณะใบของพื้ทุเนีย	5
3	แสดงลักษณะดอกของพื้ทุเนีย	5
4	แสดงลักษณะของฝัก และเมล็ดของพื้ทุเนีย	6
5	แสดงลักษณะของช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตาสามารถมองเห็นได้ โดยมีพลังงานโฟตอนที่เป็นปฏิภาคกลับกับความยาวคลื่นแสง	7
6	แสดงลักษณะของหลอดไฟ LED-T8 (a) หลอดไฟ LED ที่ให้เฉพาะแสงสีน้ำเงินในช่วงความยาวคลื่น 446 nm และสีแดงในช่วงความยาวคลื่น 660 nm (b) หลอดไฟ LED ที่ให้อุณหภูมิสีของแสง 6500 K (c) หลอดไฟ LED ที่ให้อุณหภูมิสีของแสง 3200 K	7
7	แสดงส่วนประกอบของหลอด LED (a) ชุดของหลอดไฟ (LED module) (b) อุปกรณ์ระบายความร้อนของหลอด (Heat sink) (c) อุปกรณ์เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ตัวหลอด (Driver)	8
8	แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลอดไฟแต่ละชนิดในการใช้พลังงานเพื่อให้แสงสว่าง	9
9	แสดงการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของหลอด LED กับหลอดไฟชนิดอื่น ๆ	10
10	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสง	11
11	แสดงลักษณะต้นพื้ทุเนียที่ปลูกภายใต้แสงเทียมที่แตกต่างกัน	17
12	แสดงลักษณะการตรวจวัดคุณภาพแสงเชิงสเปกตรัมของหลอด LED ด้วยเครื่อง Spectroradiometer	20
13	แสดงลักษณะการตรวจวัดช่วงความยาวคลื่นแสงที่พืชสามารถนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ด้วยเครื่อง PAR meter	20
14	แสดงกระบวนการเตรียมต้นกล้าพื้ทุเนีย และการทดลองจนกระทั่งเก็บเกี่ยวผลผลิต	23
15	แสดงสมการคำนวณปริมาณ MDA	24
16	แสดงลักษณะเส้นกราฟของแสงจากหลอด LED ทั้ง 4 ดำรับ	31

ภาพที่		หน้า
17	การเปรียบเทียบค่าร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟของแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงิน (400-500 nm) ช่วงความยาวคลื่นแสงสีเขียว (500-600 nm) ช่วงความยาวคลื่นแสงสีแดง (600-700 nm) และช่วงความยาวคลื่นฟาร์เรด (700-800 nm) ของแสง LED ทั้ง 4 ดำรับ	33
18	การเปรียบเทียบค่าร้อยละของ PAR ในช่วงความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงิน (400-500nm) ช่วงความยาวคลื่นแสงสีเขียว (500-600 nm) และช่วงความยาวคลื่นแสงสีแดง (600-700 nm) ของแสง LED ทั้ง 4 ดำรับ	34
19	ลักษณะต้น และรากของพิทูเนียที่มีอายุ 35 วันหลังจากเพาะเมล็ด โดยได้รับชั่วโมงแสงที่แตกต่างกัน 3 ช่วง คือ 8 12 และ 16 ชั่วโมงต่อวัน	35
20	ลักษณะใบของพิทูเนียที่มีอายุ 35 วันหลังจากเพาะเมล็ด โดยได้รับช่วงแสงที่แตกต่างกัน 3 ช่วง คือ 8 12 และ 16 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งในแต่ละช่วงแสงแสดงตัวอย่างใบที่ได้มาจากต้นพิทูเนีย 3 ต้น (Petunia 1 2 และ 3) ในแต่ละต้นถูกเก็บตัวอย่างมา 5 ใบ โดยใบแรก คือใบลำดับที่ 4 จากยอดบนสุดของต้นพิทูเนีย	35
21	การเจริญเติบโตของต้นพิทูเนียในแต่ละช่วงอายุ ภายใต้การได้รับช่วงแสงที่แตกต่างกัน 3 ช่วง คือ 8 12 และ 16 ชั่วโมงต่อวัน a และ c คือ มวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้นตามลำดับ ของช่วงอายุ 14 และ 21 วันหลังเพาะเมล็ด b และ d คือ มวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้นตามลำดับ ตั้งแต่ช่วงอายุ 14 ถึง 42 วันหลังเพาะเมล็ด	37
22	น้ำหนักแห้งส่วนราก (a) และสัดส่วนมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้นต่อมวลน้ำหนักแห้งส่วนราก (b) ของต้นพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด	38
23	แสดงความหนาของใบ ความยาวของเซลล์พาลิเสด และสปีนจ์ของต้นพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด	38
24	ความหนาแน่นของปากใบ ขนาดพื้นที่ของรูปากใบ และขนาดพื้นที่รูปากใบต่อพื้นที่ของใบพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด	39
25	ลักษณะของปากใบด้านบน (Adaxial surface และด้านล่าง (Abaxial surface) ของใบพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด	40

ภาพที่	หน้า
26 แสดงปริมาณคลอโรฟิลล์ a และ b คลอโรฟิลล์ทั้งหมด และสัดส่วนของคลอโรฟิลล์ a ต่อ b ของใบพืชนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด	41
27 แสดงค่า F_v/F_m (a) F_0 (b) F_m (c) และ Φ_{PSII} (d) ของใบพืชนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด	43
28 แสดงค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซ ได้แก่ ค่า A คือ อัตราการสังเคราะห์แสง (a และ b) ค่า g_s คือ ค่าอัตราการนำไหลของปากใบ (c และ d) ค่า E คือ ค่าอัตราการคายระเหยของน้ำ (e และ f) โดย a c และ e คือ ทำการตรวจวัดเป็นค่าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ใบต่อหนึ่งหน่วยเวลา ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ส่วน b d และ f คือ ทำการตรวจวัดเป็นค่าผลรวมต่อวัน ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ของใบพืชนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด	43
29 แสดงลักษณะของต้นพืชนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกัน 3 ช่วง คือ 8 12 และ 16 ชั่วโมงต่อวัน เป็นเวลา 77 วันหลังเพาะเมล็ด ภาพด้านซ้ายคือลักษณะต้นพืชนียที่ได้รับช่วงแสงที่แตกต่างกันเป็นเวลา 56 วันหลังเพาะเมล็ด และด้านขวาคือ ลักษณะต้นพืชนียที่ได้รับช่วงแสง 63 70 และ 77 วันหลังเพาะเมล็ด	44
30 แสดงความกว้าง (a) และความสูง (b) ของทรงพุ่มต้นพืชนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 77 วันหลังเพาะเมล็ด	45
31 แสดงค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซ a c และ e คือ ตรวจวัดเป็นค่าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ใบต่อหนึ่งหน่วยเวลา ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ส่วน b d และ f คือ ตรวจวัดเป็นค่าผลรวมต่อวัน ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ของใบพืชนียที่ตั้งแต่อายุ 35 – 77 วันหลังเพาะเมล็ด	46
32 แสดงมวลน้ำหนักสดส่วนลำต้น (n=3) (a) มวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น (n=3) (b) มวลน้ำหนักแห้งส่วนราก (n=3) (c) สัดส่วนมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้นต่อมวลน้ำหนักแห้งส่วนราก (n=3) (d) ความกว้างทรงพุ่ม (n=6) (e) และความสูงทรงพุ่ม (n=6) (f) ของต้นพืชนียในระยะที่พบดอกแรกบาน ของการได้รับช่วงแสงที่แตกต่างกัน	49

ภาพที่	หน้า	
33	แสดงจำนวนวันก่อนดอกแรกบาน โดยนับวันแรกหลังจากเพาะเมล็ด (n=3) (a) จำนวนใบของกิ่งก่อนการพบการออกดอกแรก (n=18) (b) จำนวนดอก (n=3) (c) จำนวนฝักต่อต้น (n=3) (d) และขนาดฝักในช่วงลำดับฝักที่1-10 (n=34) (e) ของต้นพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงที่แตกต่างกัน	50
34	แสดงลักษณะต้นพิทูเนีย และจำนวนวันที่พบดอกแรกบาน โดยการได้รับช่วง แสง 16 h พบดอกแรกบาน ที่อายุเฉลี่ย 53 วันหลังจากเพาะเมล็ด การได้รับ ช่วงแสง 12 h พบดอกแรกบาน ที่อายุเฉลี่ย 61 วันหลังจากเพาะเมล็ด และ การได้รับช่วงแสง 8 h พบดอกแรกบาน ที่อายุเฉลี่ย 70 วันหลังจากเพาะเมล็ด โดยจำนวนวันก่อนดอกแรกบาน ของการได้รับช่วงแสง 16 h ต่างจากการ ได้รับช่วงแสง 12 h จำนวน 8 วัน และต่างจากการได้รับช่วงแสง 8 h จำนวน 17 วัน	51
35	แสดงจำนวนเมล็ดต่อฝัก (n=12) (a) จำนวนเมล็ดต่อต้น (n=3) (b) มวล น้ำหนักสดของเมล็ด (n=9) (c) และมวลน้ำหนักแห้งของเมล็ด (n=9) (d) ของ ต้นพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงที่แตกต่างกัน	52
36	แสดงปริมาณโปรตีนในเมล็ด (n=12) (a) ความชื้นเมล็ด (n=9) (b) เปอร์เซ็นต์ ความงอก (n=7) (c) และค่าเฉลี่ยจำนวนวันที่ใช้ในการงอก (n=7) (d) ของ ต้นพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงที่แตกต่างกัน	53
37	แสดงเส้นตอบสนองต่อแสงของคุณภาพแสงทั้ง 4 ดำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับ ค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซ ได้แก่ ค่าอัตราการสังเคราะห์แสง (a) ค่าอัตราการคายระเหยของน้ำ (b) ค่าอัตราการนำไหลของปากใบ (c) และปริมาณ CO ₂ ในช่องว่างระหว่างเซลล์ของใบพิทูเนีย (d)	54
38	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง (50-200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) กับค่าอัตรา การสังเคราะห์แสงภายใต้คุณภาพแสงทั้ง 4 ดำรับ	55
39	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสง ในการตรึง CO ₂ (Quanta/CO ₂ uptake) ของใบพิทูเนียภายใต้คุณภาพแสงทั้ง 4 ดำรับ	56

ภาพที่	หน้า	
40	แสดงค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซ ได้แก่ ค่าอัตราการสังเคราะห์แสง (a) ค่าอัตราการคายระเหยของน้ำ (b) และค่าอัตราการนำไหลของปากใบ (c) ของใบพิทูเนียในช่วงอายุ 63-70 วันหลังเพาะเมล็ด โดยได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ตำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB และได้รับความเข้มแสง 2 ระดับ คือ 200 และ 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	59
41	แสดงค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซ ได้แก่ ค่าอัตราการสังเคราะห์แสง (a และ b) ค่าอัตราการคายระเหยของน้ำ (c และ d) และค่าอัตราการนำไหลของปากใบ (e และ f) ของใบพิทูเนียตั้งแต่อายุ 56-77 วันหลังเพาะเมล็ด โดยได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ตำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB และได้รับความเข้มแสง 2 ระดับ คือ 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (b d และf) และ 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (a c และe)	60
42	แสดงค่าความชันของเส้นแนวโน้ม และทิศทางความสัมพันธ์ (ค่าความชันของเส้นแนวโน้มที่ติดลบ หมายถึง อายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซลดลง ค่าความชันของเส้นแนวโน้มที่เป็นบวก หมายถึง อายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซเพิ่มขึ้น) ระหว่างค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซกับอายุพืช	61
43	แสดงปริมาณ MDA ในใบพิทูเนียตั้งแต่อายุ 56-77 วันหลังเพาะเมล็ด โดยได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ตำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB และได้รับความเข้มแสง 2 ระดับ คือ 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (n=3) (a) และ 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (n=3) (b) แสดงค่าความชันของเส้นแนวโน้ม และทิศทางความสัมพันธ์ (ค่าความชันของเส้นแนวโน้มด้านลบ คือ อายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณ MDA ลดลง ค่าความชันของเส้นแนวโน้มด้านบวก คือ อายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณ MDA เพิ่มขึ้น) ปริมาณ MDA กับอายุพืช (n=3) (c) และเปรียบเทียบปริมาณ MDA ระหว่างความเข้มแสง 2 ระดับ ภายใต้คุณภาพแสงทั้ง 4 ตำรับของใบพิทูเนียในช่วงอายุ 70-77 วันหลังเพาะเมล็ด (d) (n=4)	62
44	แสดงค่า F_v/F_m (a) Φ_{PSII} (b) และ ETR (Electron Transport Rate) (d) ของใบพิทูเนียในช่วงอายุ 63-70 วันหลังเพาะเมล็ด โดยได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ตำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB และได้รับความเข้มแสง 2 ระดับ คือ 200 และ 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	63

ภาพที่

หน้า

- 45 แสดงประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII (maximum quantum efficiency) ได้แก่ F_v/F_m (a และ b) Φ_{PSII} (c และ d) และ ETR (e และ f) ของใบพืชน้ำตั้งแต่อายุ 56-77 วันหลังเพาะเมล็ด โดยได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ดารับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB และได้รับความเข้มแสง 2 ระดับ คือ $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (a c และ e) และ $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (b d และ f) 64
- 46 แสดงค่าความชันของเส้นแนวโน้ม และทิศทางความสัมพันธ์ (ค่าความชันของเส้นแนวโน้มด้านลบ คือ อายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII ลดลง ค่าความชันของเส้นแนวโน้มด้านบวก คือ อายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII เพิ่มขึ้น) ระหว่างประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII กับอายุพืช 65
- 47 แสดงมวลน้ำหนักสด (a) และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น (b) มวลน้ำหนักแห้งส่วนราก (c) สัดส่วนของมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้นต่อมวลน้ำหนักแห้งส่วนราก (d) และประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเป็นมวลสารแห้ง (e) 67
- 48 แสดงลักษณะต้นพืชน้ำ (ภาพชุดด้านซ้ายมือแสดงลักษณะมุมมองด้านบน และภาพชุดด้านขวามือแสดงมุมมองด้านข้าง) ที่ได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ดารับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB และได้รับความเข้มแสง 2 ระดับ คือ $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (a) และ $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 69
- 49 แสดงความกว้าง (a) และความสูง (b) ของต้นพืชน้ำตั้งแต่อายุ 35-70 วันหลังเพาะเมล็ด โดยได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ดารับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB และแสดงค่าความชันของเส้นแนวโน้ม และทิศทางความสัมพันธ์ (ค่าความชันของเส้นแนวโน้มด้านลบ คือ อายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดทรงพุ่มลดลง ค่าความชันของเส้นแนวโน้มด้านบวก คือ อายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดทรงพุ่มเพิ่มขึ้น) ของความกว้าง (c) และความสูง (d) กับอายุพืช 70
- 50 แสดงลักษณะด้านข้างของต้นพืชน้ำที่มีอายุ 70 และ 77 วันหลังเพาะเมล็ด ที่ได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ดารับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB 71
- 51 แสดงมวลน้ำหนักสด (a) และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น (b) ของต้นพืชน้ำที่มีอายุ 80 วันหลังเพาะเมล็ด 72

ภาพที่		หน้า
52	แสดงจำนวนวันก่อนดอกแรกบาน โดยนับวันแรกหลังจากเพาะเมล็ด	73
53	แสดงจำนวนใบของกิ่งก่อนการพบการออกดอกแรก (n=12) (a) จำนวนกิ่งที่ออกดอก (n=8) (b) จำนวนดอกต่อกิ่ง (n=9) (d) และจำนวนดอกต่อต้น (n=8) ของต้นพิทูเนียที่มีอายุ 79 วันหลังเพาะเมล็ด	73
54	แสดงจำนวนดอกในแต่ละวันต่อเนื่องเป็นเวลา 1 เดือน (ตั้งแต่อายุพืช 50-80 วันหลังเพาะเมล็ด) (a) และแสดงค่าความชันของเส้นแนวโน้ม (b) โดยได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ดำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB	74
55	แสดงความยาวก้านดอก (a) และขนาดดอก (b) ของต้นพิทูเนียที่ปลูกภายใต้แสง 4 ดำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB	75
56	แสดงเปอร์เซ็นต์การติดฝักหลังจากการผสมเกสร (n=8) (a) จำนวนฝักต่อต้น (n=8) (b) และขนาดฝัก (n=20) (c) ของต้นพิทูเนียที่ปลูกภายใต้แสง 4 ดำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB	76
57	แสดงเปอร์เซ็นต์ความมีชีวิตของละอองเรณู (n=8) (a) เปอร์เซ็นต์ความออกของละอองเรณู (n=30) (b) จำนวนเมล็ดต่อฝัก (n=5) (c) จำนวนเมล็ดต่อต้น (n=3) (d) และประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงเพื่อผลิตเมล็ดพันธุ์ (n=3) (e) ของต้นพิทูเนียที่ปลูกภายใต้แสง 4 ดำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB	77
58	แสดงจำนวนเมล็ดต่อฝัก (ตั้งแต่ฝักที่1-ฝักที่100) (a) และแสดงค่าความชันของเส้นแนวโน้ม (b) ของต้นพิทูเนียที่ได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ดำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB	78
59	แสดงมวลน้ำหนักสดของเมล็ด (a) และมวลน้ำหนักแห้งของเมล็ด (b) โดยได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ดำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K RB และเมล็ดที่ผลิตโดยบริษัท เอ เอฟ เอ็ม ฟลาวเวอร์ ซีดส์ จำกัด ประเทศไทย (AFM)	79
60	แสดงปริมาณโปรตีนในเมล็ด (a) ความชื้นเมล็ด (b) เปอร์เซ็นต์ความออก (c) และค่าเฉลี่ยจำนวนวันที่ใช้ในการงอก (d) ของต้นพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงที่แตกต่างกัน	80
61	แสดงหลักการเปล่งแสงสีขาวจากแหล่งกำเนิดแสงของสารกึ่งตัวนำชนิด Gallium nitride	85

บทที่ 1

บทนำ

พิทูเนีย (Petunia) เป็นไม้ดอกล้มลุกฤดูเดียว ดอกมีสีสวยงามจัดอยู่ในวงศ์ solanaceae (Rijkema et al., 2006) ในปัจจุบันนิยมปลูกพิทูเนียให้เป็นไม้ดอกฤดูเดียว ต้นพิทูเนียมีลักษณะทรงพุ่มเตี้ย และค่อนข้างเลื้อย ลำต้นสูงประมาณ 30 เซนติเมตร ขนาดดอก และสีแตกต่างกันออกไปตามชนิดพันธุ์ (สมเพียร, 2526; Sink, 1984) ปัจจัยทางสภาพแวดล้อมมีอิทธิพลต่อการออกดอกของต้นพิทูเนีย โดยจะออกดอกได้มาก เมื่อได้รับปัจจัยบางอย่าง เช่น ได้รับช่วงแสงวันยาว ความเข้มแสงสูง หรืออุณหภูมิสูง เป็นต้น (Adams et al. 1999) เมล็ดพิทูเนียมีลักษณะกลม สีดำปนน้ำตาล และมีขนาดเล็ก โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.6 ถึง 0.7 มิลลิเมตร ในหนึ่งฝักอาจมีเมล็ดตั้งแต่ 130 ถึง 1,065 เมล็ด เมล็ด 1 กรัม จะมีจำนวนเมล็ดประมาณ 11,000 เมล็ด ทั้งนี้จำนวนเมล็ด และน้ำหนักของเมล็ดขึ้นอยู่กับชนิดพันธุ์ของพิทูเนียด้วย พิทูเนีย 1 ต้นสามารถออกดอกได้มากกว่า 100 ดอก (สมเพียร, 2526; Gunn, 1974)

มูลค่าการซื้อขายเมล็ดพันธุ์พิทูเนียคิดเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ ของไม้ดอกประดับทั้งหมดในประเทศสหรัฐอเมริกา (Sink, 1984) ในประเทศไทยมูลค่าการส่งออกเมล็ดพันธุ์พิทูเนียในปี พ.ศ. 2550 คิดเป็นอันดับสองของการส่งออกเมล็ดพันธุ์ไม้ดอกประดับทั้งหมด (สมาคมเมล็ดพันธุ์แห่งประเทศไทย, 2550) การผลิตเมล็ดพันธุ์พิทูเนียในประเทศไทย สามารถผลิตได้โดยเฉลี่ยปีละ 1 รอบเท่านั้น เนื่องจากพิทูเนียจะเจริญเติบโต และติดเมล็ดได้ดีในสภาพอากาศเย็น ปัจจุบันการปลูกในสภาพแวดล้อมปกตินั้น ให้ผลผลิตเมล็ดพันธุ์ต่อหน่วยพื้นที่ค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้ ในแต่ละปีสภาพภูมิอากาศมีความแปรปรวนมากขึ้น (อรรคเดช และพัชรี, 2554) ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายในการผลิตเมล็ดพันธุ์พิทูเนีย อีกทั้งในปัจจุบันประสบปัญหาการแพร่ระบาดของโรคจากไวรัสใบยาสูบต่างในพิทูเนีย ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของเมล็ดพันธุ์

ระบบโรงงานพืช (Plant factory) คือ ระบบปลูกพืชที่มีการควบคุมปัจจัยสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น แสง อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช จึงสามารถทำการเพาะปลูกได้ตลอดทั้งปี โดยไม่ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมภายนอก สามารถให้ผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่ได้สูง เพราะสามารถเพาะปลูกในแนวตั้งได้ (Kozai, 2007; Kozai et al., 2015) ระบบการปลูกพืชลักษณะนี้ เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่จะแก้ไขปัญหา สภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม รวมทั้งการรบกวนจากโรค และแมลงได้ อย่างไรก็ตามต้นทุนของเทคโนโลยีในการดำเนินการผลิตนั้นค่อนข้างสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้นทุนของพลังงานที่ต้องใช้กับแหล่งกำเนิดแสงในระบบปลูก

ไดโอดเปล่งแสงหรือหลอดไฟแอลอีดี (Light-emitting diode ; LED) เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นทางเลือกใหม่ในยุคปัจจุบัน การเปล่งแสงจาก LED เกิดจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำสองชนิดที่ประกบกันอยู่ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงเพียงเล็กน้อย ซึ่งเหนี่ยวนำให้ประจุของสารกึ่งตัวนำสองชนิดวิ่งมาชนกันบริเวณระหว่างรอยต่อของสารทั้งสองชนิดนี้ ส่งผลให้อิเล็กตรอนเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน และคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแสง ทำให้เกิดแสงสว่างในทิศทางด้านหน้าของตัวหลอด (Chang et al., 2012; Singh et al., 2015) LED ถือเป็นหลอดไฟที่ใช้พลังงานในการส่องสว่างอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเทียบกับหลอดประเภทอื่นๆ โดยมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานที่สูงกว่าหลอดไส้ (incandescent light bulb) และหลอดฟลูออเรสเซนต์ ประมาณ 20 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีอายุการใช้งานมากกว่าหลอดไฟชนิดอื่น ๆ ประมาณ 60 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ (Bourget, 2008) อีกทั้งยังสามารถให้กำเนิดแสงสีต่าง ๆ ที่มีความหลากหลาย เช่น ม่วง น้ำเงิน เขียว เหลือง แดง ขาว ในปัจจุบันมีการผลิตหลอด LED ที่ให้แสงในช่วงความยาวคลื่น ที่พืชสามารถนำไปใช้ในการสังเคราะห์แสงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ 400 ถึง 500 นาโนเมตร ซึ่งเป็นแสงสีน้ำเงิน และ 600 ถึง 700 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงแสงสีแดง (Denbaars et al., 2013; Gupta and Jatothu, 2013) โดยหลอด LED สีน้ำเงินและแดงถูกใช้อย่างแพร่หลายในระบบโรงงานพืช (Kozai et al., 2015)

จากการทดลองปลูกต้นพืชนีในสภาวะควบคุมปัจจัยแวดล้อมเบื้องต้นภายใต้แสงจากหลอด LED ณ ห้องควบคุมสภาพแวดล้อมของมหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ พบว่า ต้นพืชนีสามารถเจริญเติบโตได้ดี แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้หลอด LED ในการปลูกต้นพืชนีในระบบโรงงานพืชเพื่อผลิตเมล็ดพันธุ์ การศึกษาในครั้งนี้จึงมีจุดมุ่งหมายในการศึกษาอิทธิพลของแสงต่อการเจริญเติบโตและการผลิตเมล็ดพันธุ์ของต้นพืชนีภายใต้ระบบโรงงานพืชแบบกึ่งปิด นอกจากนี้จะได้นำมาศึกษาความคุ้มค่าของการปลูกต้นพืชนีในระบบกึ่งปิดเพื่อผลิตเมล็ดพันธุ์อีกด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของแสงจากหลอด LED ต่อการเจริญเติบโต และการให้ผลผลิตเมล็ดพันธุ์ของต้นพืชนี
2. เพื่อศึกษาความคุ้มค่าของการใช้หลอด LED ในการผลิตเมล็ดพันธุ์พืชนีในระบบกึ่งปิด

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ข้อมูลสภาพแสงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต และให้ผลผลิตเมล็ดพันธุ์ของต้นพืทุเนีย
2. ข้อมูลการเลือกใช้หลอด LED ที่มีความคุ้มค่ามากที่สุดในการผลิตเมล็ดพันธุ์ในระบบกึ่งปิด

ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาระบบการให้แสงต่อการเจริญเติบโต และผลิตเมล็ดพันธุ์ของต้นพืทุเนียพันธุ์ Purple โดยใช้หลอดไฟ LED เท่านั้น โดยมีการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ภายใต้ระบบกึ่งปิด ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ชั่วโมงการให้แสง และองค์ประกอบของสารละลายปุ๋ย ทำการวิจัย ณ ห้องควบคุมสภาพแวดล้อม สาขาพืชผักของมหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

ข้อมูลทางพฤกษศาสตร์ของพิทูเนีย

พิทูเนียมีชื่อสามัญว่า Petunia หรือ Sunweed มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Petunia × hybrida* Vilm จัดอยู่ในวงศ์ Solanaceae (Rijkema et al., 2006) มีถิ่นกำเนิดเดิมอยู่ในประเทศบราซิล และอาร์เจนตินา ชื่อพิทูเนีย มาจากภาษาบราซิล แปลว่า ต้นยาสูบ เนื่องจากต้นพิทูเนียมีลักษณะคล้ายต้นยาสูบ (นันทิยา, 2535; Sink, 1984)

พิทูเนียจัดเป็นพืชฤดูเดียว (Annuals) ที่มีดอกสวยงาม และมีหลายสี ลำต้นเป็นไม้เนื้ออ่อน มีลักษณะเป็นพุ่มเตี้ย และค่อนข้างเลื้อย มักขยายพันธุ์ด้วยการเพาะเมล็ด สูงประมาณ 30 เซนติเมตร (สมเพียร, 2526; Sink, 1984) (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 ลักษณะต้นพิทูเนียที่มีดอกสีม่วง

ใบพิทูเนียมีลักษณะคล้ายใบยาสูบแต่มีขนาดเล็กกว่า กว้างประมาณ 5 เซนติเมตร และยาวประมาณ 3 - 10 เซนติเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดพันธุ์ และความสมบูรณ์ของต้น มีขนอยู่ทั่วไปตามผิวใบ ทั้งด้านหน้า และด้านหลัง ลักษณะใบเป็นรูปไข่ (ovate) ปลายใบแหลม (acute) เนื้อใบอ่อน (soft) ขอบใบเรียบ (furnelform) (ราชบัณฑิตยสถาน, 2541; สมเพียร, 2526) (ภาพที่ 2)



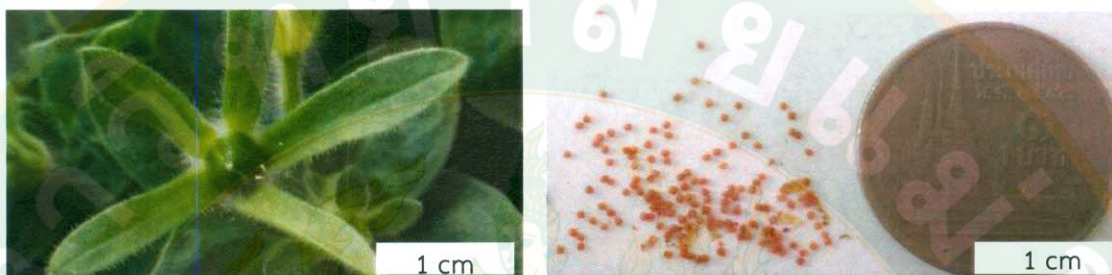
ภาพที่ 2 แสดงลักษณะใบของพิทูเนีย

ดอก มีสีที่หลากหลาย และมีระยะเวลาการบานของดอกนานประมาณ 5-7 วัน บางพันธุ์มีกลิ่นหอมอ่อน (นันทิยา, 2535) ดอกพิทูเนียเป็นดอกสมบูรณ์เพศ มีลักษณะเป็นดอกเดี่ยว (solitary) มีทั้งชนิดดอกซ้อน (double) และดอกชั้นเดียว (single), ก้านดอกเกิดที่ยอด (terminal) หรือ ตามส่วนข้างของลำต้น วงกลีบเลี้ยง (calyx) และกลีบดอก (corolla) มี 5 แฉก มีคอหลอดดอก (throat) ยาว มีเกสรเพศผู้ (stamen) 5 อัน เกสรเพศเมีย (pistil) 1 อัน ขนาดของดอก และสีแตกต่างกันไป ตามประเภท และพันธุ์ (ราชบัณฑิตยสถาน, 2541; สมเพียร, 2526) พิตูเนียจะออกดอกได้เร็ว เมื่อได้รับช่วงแสงวันยาว หรือความเข้มแสงสูง หรืออุณหภูมิสูง เป็นต้น (Adams et al., 1999) (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 3 แสดงลักษณะดอกของพิทูเนีย

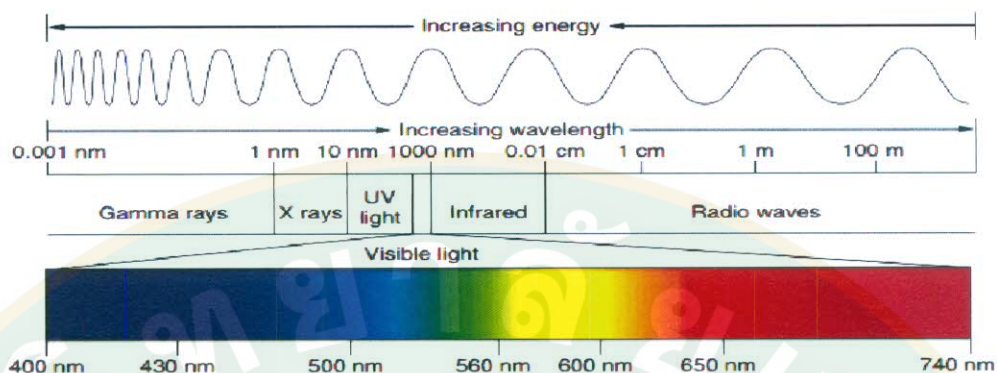
เมล็ดพิทูเนียมีลักษณะกลม สีน้ำตาลปนดำ เมล็ดมีขนาดเล็ก มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.5 ถึง 0.6 มิลลิเมตร ในหนึ่งฝักอาจมีตั้งแต่ 100 ถึง 300 เมล็ด น้ำหนักเมล็ด 1 ออนซ์ (28.35 กรัม โดยประมาณ) ในหนึ่งต้นจะมีจำนวนเมล็ดประมาณ 11,000 ถึง 250,000 เมล็ด ทั้งนี้จำนวนเมล็ดขึ้นอยู่กับชนิดพันธุ์ของพิทูเนีย (สมเพียร, 2526; Gunn, 1974) (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 4 แสดงลักษณะของฝัก และเมล็ดของพิทูเนีย

คุณสมบัติของแสง

แสงอาทิตย์นั้น เกิดจากปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ เป็นพลังงานที่แผ่ออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (วรณูช, 2553) แสงมีคุณสมบัติทั้งของคลื่น และของอนุภาค ซึ่งอนุภาคของพลังงานแสงนี้เรียกว่า โฟตอน (Photon) หรือเรียกว่าเป็นควอนตัม (Quantum) ของพลังงาน (Chang et al., 2012) โดยทั่วไปแสงประกอบด้วยช่วงคลื่นที่สำคัญ 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงรังสีเหนือม่วง (Ultraviolet) เป็นรังสีที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 380 นาโนเมตร ช่วงรังสีที่ตามองเห็น (Visible light) เป็นรังสีที่มีความยาวคลื่น 400 ถึง 750 นาโนเมตร และช่วงแสงแดงไกล (Infrared) เป็นรังสีที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 760 นาโนเมตร (วรณูช, 2553) พลังงานของโฟตอนจะเป็นปฏิภาคกลับกับความยาวคลื่น ดังนั้นแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำจะมีพลังงานของอนุภาคมากกว่าแสงที่มีความยาวของคลื่นมาก เช่น แสงที่มีความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร (แสงสีน้ำเงิน) จะมีพลังงานมากกว่าแสงที่มีความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร (แสงสีแดง) (ชวนพิศ, 2544) (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 แสดงลักษณะของช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตาสามารถมองเห็นได้ โดยมีพลังงานโฟตอนที่เป็นปฏิภาคกลับกับความยาวคลื่นแสง

ที่มา: Vanninen et al. (2010)

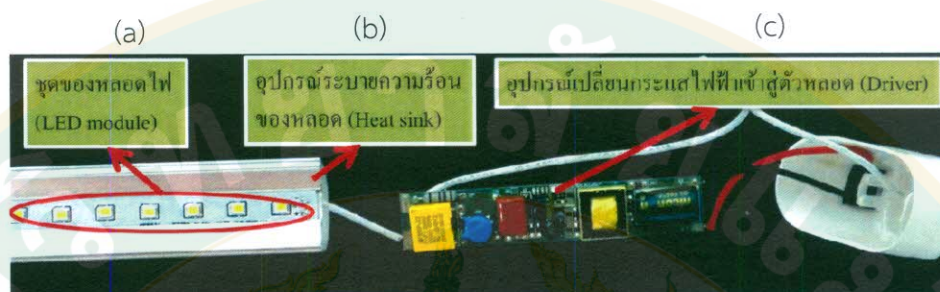
แหล่งกำเนิดแสงเทียม ประเภทหลอด LED

LED เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทหนึ่ง โดยจัดอยู่ในจำพวกไดโอดที่สามารถเปล่งแสงได้ในช่วงสเปกตรัมแคบ เช่น ช่วงแสงสีน้ำเงิน (450-500 nm) สีเขียว (500-570 nm) สีส้ม (590-610 nm) หรือสีแดง (610-760 nm) เป็นต้น สีของแสงที่เปล่งออกมานั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุกึ่งตัวนำที่ใช้และสารที่ใช้เคลือบชิป นอกจากนี้ LED สามารถเปล่งแสงได้ทั้งในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) ช่วงแสงที่มองเห็น (visible light) และช่วงแสงแดงไกล (Gupta and Jatothu, 2013; Singh et al., 2015)



ภาพที่ 6 แสดงลักษณะของหลอดไฟ LED-T8 (a) หลอดไฟ LED ที่ให้เฉพาะแสงสีน้ำเงินในช่วงความยาวคลื่น 446 nm และสีแดงในช่วงความยาวคลื่น 660 nm (b) หลอดไฟ LED ที่ให้อุณหภูมิสีของแสง 6500 K (c) หลอดไฟ LED ที่ให้อุณหภูมิสีของแสง 3200 K

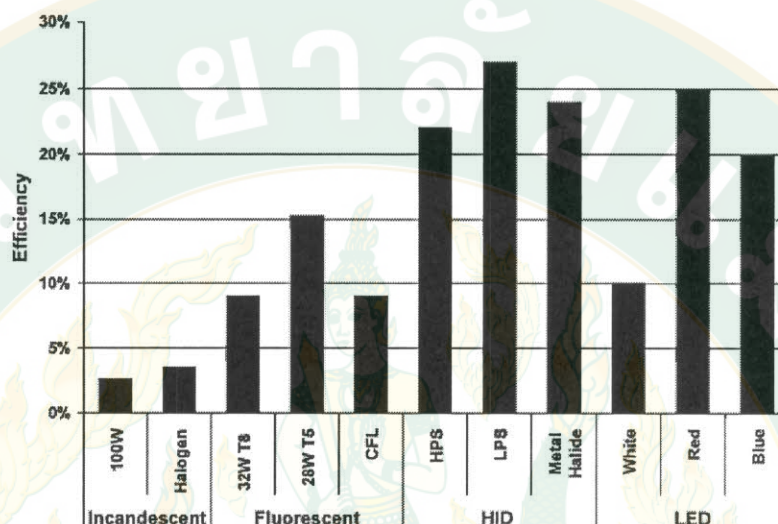
หลอด LED-T8 ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักสามส่วน ได้แก่ ชุดของหลอดไฟ (LED module) อุปกรณ์เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ตัวหลอด (Driver) และอุปกรณ์ระบายความร้อนของหลอด (Heat sink) (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 7 แสดงส่วนประกอบของหลอด LED (a) ชุดของหลอดไฟ (LED module) (b) อุปกรณ์ระบายความร้อนของหลอด (Heat sink) (c) อุปกรณ์เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ตัวหลอด (Driver)

หลักการทำงานของชิปเปล่งแสง LED ประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำสองชนิด คือ ขั้วประจุบวกชนิด P (Positively charged material) และสารกึ่งตัวนำขั้วประจุลบชนิด N (Negatively charged material) โดยสารทั้งสองชนิดนี้จะประกบเข้าด้วยกัน และมีบริเวณช่องระหว่างรอยต่อเล็กน้อย เรียกว่า รอยต่อ (Junction) เมื่อเปิดสวิตช์ไฟ กระแสไฟฟ้าจะผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนกระแสไฟฟ้า เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และเปลี่ยนจากความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงไปสู่ความต่างศักย์ไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ (Yeh and Chung, 2009; Gupta and Jatothu, 2013) ประมาณ 2.5 ถึง 3 โวลต์ แล้วจึงจ่ายเข้าตัวชิปของหลอด LED ซึ่งมีเพียงตัวนำแคโทด และแอโนดเท่านั้น หลอด LED จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านน้อยมาก ประมาณ 20 มิลลิแอมป์ (Chang et al., 2012) จ่ายไฟขั้วบวกให้ขาแอโนด และจ่ายไฟขั้วลบให้ขาแคโทด ทำให้อิเล็กตรอนที่สารกึ่งตัวนำชนิด N มีพลังงานสูงขึ้น จนสามารถวิ่งข้ามรอยต่อจากสารชนิด N ไปรวมกับโฮล (อิเล็กตรอนวงนอกของสารกึ่งตัวนำที่อยู่ในสภาวะขาดอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะ 1 คู่ ซึ่งมีสภาพเป็นประจุไฟฟ้าบวก) ในสารชนิด P เป็นผลให้เกิดการชนกันของประจุบวก และประจุลบที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด เป็นผลให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไป และคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแสง ซึ่งเรียกว่า “อิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ (Electroluminescence)” ทำให้เกิดแสงสว่างที่บริเวณด้านหน้าตัวหลอด (Gupta and Jatothu, 2013; Singh et al., 2015) โดยมีลักษณะพุ่งออกในทิศทางเดียว แต่ในกรณีที่ต้องการให้แสงกระจายออกในมุมแคบหรือกว้างเพิ่มขึ้น จะใช้อุปกรณ์ที่มีลักษณะเหมือนเลนส์ (Lens package) ครอบหลอด LED ไว้เพื่อบังคับทิศทางของการกระจายแสง (Liu et al., 2009)

หลอด LED มีประสิทธิภาพการให้แสงสว่างสูง เมื่อเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการส่องสว่างกับหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ (Incandescent) และหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent; FL) พบว่าหลอดไฟ LED มีประสิทธิภาพสูงกว่า ประมาณ 1 ถึง 4 เท่า และ 1 ถึง 2 เท่า ตามลำดับ (ภาพที่ 8) (Bourget, 2008)



ภาพที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลอดไฟแต่ละชนิดในการใช้พลังงานเพื่อให้แสงสว่าง

หมายเหตุ W คือ กำลังไฟ (Watt)

T5 และ T8 คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดไฟ 5 นิ้ว และ 8 นิ้ว

CFL คือ หลอดไฟคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ (Compact Fluorescent)

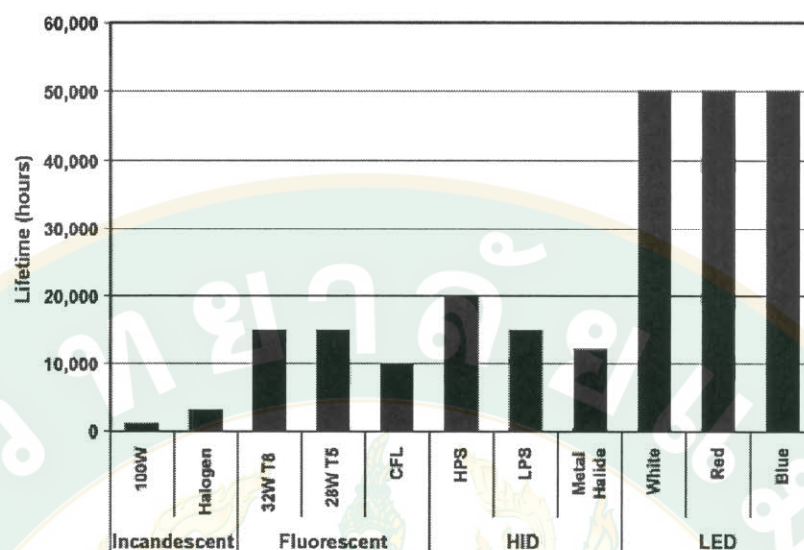
HID คือ หลอดไฟชนิดความดันไอสูง (Hyper Intensity Discharge)

HPS คือ หลอดโซเดียมความดันไอสูง (High Pressure Sodium)

LPS คือ หลอดโซเดียมความดันไต่ำ (Low Pressure Sodium)

ที่มา: Bourget (2008)

หลอด LED มีน้ำหนักเบา และมีขนาดเล็ก มีความแข็งแรง ทนต่อการสั่นสะเทือน ปลดปล่อยความร้อนออกมาน้อยมากทำให้ลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในห้องที่มีเครื่องปรับอากาศได้ เมื่อเปิดจะให้แสงสว่างโดยทันที มีอายุการใช้งานยาวนาน 40,000 ถึง 50,000 ชั่วโมง เมื่อเทียบอายุการใช้งานกับ หลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ และ FL พบว่า หลอด LED มีอายุการใช้งานที่สูงกว่าประมาณ 5 ถึง 10 เท่า (ภาพที่ 9) นอกจากนี้ หลอด LED ยังมีหลายชนิดซึ่งสามารถให้กำเนิดแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกันตามความต้องการได้ (Bourget, 2008; Singh et al., 2015)



ภาพที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของหลอด LED กับหลอดไฟชนิดอื่น ๆ

ที่มา: Bourget (2008)

ความคุ้มค่าของการปลูกพืชภายใต้แสงเทียมประเภท LED

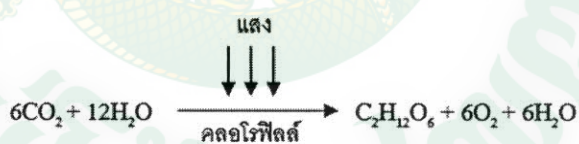
การปลูกพืชในระบบปิดภายใต้แสงเทียมสามารถให้ผลผลิตที่มีคุณภาพ และปริมาณต่อหน่วยพื้นที่สูง อายุการเก็บเกี่ยวสั้น อีกทั้งสามารถปลูกได้หลายรอบต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับ การปลูกในสภาพแวดล้อมปกติ หรือการปลูกในโรงเรือนที่ใช้พลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ ซึ่งให้ผลผลิตต่ำกว่า และควบคุมคุณภาพได้ยาก รวมทั้งต้องใช้เวลามากกว่าการปลูกพืชในระบบปิด (Kozai, 2007; Dong et al., 2015) อย่างไรก็ตาม การปลูกพืชในระบบปิดภายใต้แสงเทียมนั้น จะมีต้นทุนผันแปรในการผลิตสูง โดยร้อยละ 25 – 30 เป็นต้นทุนผันแปรของอุปกรณ์ใช้ไฟฟ้า ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นหลอดไฟจำนวนมากที่ให้กำเนิดแสงสว่างสำหรับการปลูกพืช (Kozai et al., 2015) ดังนั้นผู้ปลูกจึงควรให้ความสำคัญกับประเภท และประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดแสงเทียมเป็นพิเศษ โดยจะต้องมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช และผลผลิตที่ได้จะต้องมีความคุ้มค่าต่อพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปมากที่สุด

เทคโนโลยีแสงเทียมในปัจจุบันมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งหลอดไฟประเภท LED ซึ่งมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงกว่าหลอดไฟชนิดอื่น ๆ (Bourget, 2008; Nelson and Bugbee, 2014) สามารถเลือกใช้ช่วงความยาวคลื่นได้หลากหลาย (Singh et al., 2015) ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเทียมในการปลูกพืชจากการศึกษาของ Shimizu et al. (2011) แสดงให้เห็นว่าการใช้หลอดไฟ LED ในการปลูกผักกาด ส่งผลให้ผักกาดมี

ประสิทธิภาพในการนำพลังงานแสงไปใช้ในการเจริญเติบโต (Production efficiency; g/W) มากกว่าการปลูกภายใต้แสงจากหลอดไฟ FL นอกจากนี้การศึกษาของ Lin et al. (2013) พบว่า การปลูกผักกาดภายใต้แสงเทียมจากหลอดไฟ LED ส่งผลให้ได้ต้นที่มีน้ำหนักสดสูง มีรสชาติหวาน กรอบ และการสะสมของไนเตรดต่ำกว่าการปลูกภายใต้แสงเทียมจากหลอดไฟ FL อีกด้วย

การสังเคราะห์แสงของพืช

สิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ล้วนมีความเกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งในทางตรง และทางอ้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสิ่งมีชีวิตที่มีคลอโรฟิลล์เป็นองค์ประกอบ เช่น พืช สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Cyanobacteria) และ สาหร่าย (Algae) (วันเพ็ญ, 2547; นงลักษณ์ และปรีชา, 2554) แสงจากดวงอาทิตย์นั้น เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของพืชในกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยพืชจะเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมี เพื่อนำมาใช้ในการสร้างอาหาร โดยมีน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวัตถุดิบ ผลผลิตที่ได้ คือ น้ำตาล และมีผลพลอยได้จากปฏิกิริยาแสง คือ ออกซิเจน (สมบุญ, 2548) ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงจะถูกนำไปใช้เป็นพลังงานในการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของพืช อีกส่วนหนึ่งจะเก็บสะสมไว้ในรูปของแป้ง หรืออาจจะถูกนำไปใช้ในการสร้างไขมัน หรือโปรตีน และเก็บสะสมไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืช (วันเพ็ญ, 2547) ปฏิกิริยาของการสังเคราะห์แสงเขียนสรุปได้ดังนี้ (ภาพที่ 10)



ภาพที่ 10 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสง

ที่มา: วันเพ็ญ (2547; สมบุญ, 2548)

กระบวนการสังเคราะห์แสงเกิดขึ้นในคลอโรพลาสต์ (Chloroplast) ซึ่งภายในประกอบไปด้วยถุงไทลาคอยด์ (Thylakoid) ที่ซ้อนเป็นชั้นอยู่เป็นกลุ่ม ๆ แต่ละกลุ่มเรียกว่ากรานา (Grana) ส่วนสโตรมา (Stroma) ซึ่งเป็นของเหลวในคลอโรพลาสต์ ประกอบไปด้วยสารเคมี และเอนไซม์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยปฏิกิริยาแสง (light reaction) จะเกิดขึ้นบนเยื่อหุ้มไทลาคอยด์ ซึ่งมีรงควัตถุ เอนไซม์ สารส่งอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องกับการดูด และเก็บพลังงานแสง และ

เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานเคมี ในส่วนของปฏิกิริยาคาร์บอน (carbon reaction) จะเกิดขึ้นใน สโตรมา (สมบุญ, 2548)

รงควัตถุที่พบในสิ่งมีชีวิตที่สังเคราะห์ด้วยแสงได้ มีหลายชนิด โดยที่พบในสิ่งมีชีวิตชั้นสูง ได้แก่ คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) แคโรทีนอยด์ (Carotenoids) และไฟโคบิลิน (Phycobilin) ส่วนรงควัตถุที่พบเฉพาะในสิ่งมีชีวิตชั้นต่ำ เช่น แบคทีเรียโอคลอโรฟิลล์ (Bacteriochlorophyll) รงควัตถุแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการดูดพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน (ชวนพิศ, 2544) รงควัตถุหลายชนิดไม่ได้ทำหน้าที่ดูดแสงในกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยตรง แต่จะทำหน้าที่รับพลังงานแสงจากรงควัตถุอื่น แล้วส่งต่อไปตามลำดับจนกระทั่งถึงคลอโรฟิลล์เอโมเลกุลพิเศษ ที่เป็น ส่วนประกอบของ ศูนย์กลางของปฏิกิริยา (Reaction center) ของระบบแสง (สมบุญ, 2548) รงควัตถุประกอบจำพวก แคโรทีนอยด์ และไฟโคบิลินส์ ได้ชื่อว่าเป็นเม็ดสีสังเคราะห์แสงส่วนเสริม (สัมฤทธิ์, 2544) เนื่องจากสามารถดูดกลืนแสง และส่งผ่านพลังงานแสงไปยังคลอโรฟิลล์เอได้ ส่งผลให้คลอโรพลาสต์มีความสามารถในการเก็บเกี่ยวพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นอื่น ๆ ที่คลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์บีไม่สามารถดูดกลืนไว้ได้ (สมบุญ, 2548) โดยทั่วไปคลอโรฟิลล์เอ และบี จะดูดกลืนแสงได้มากในช่วงแสงสีน้ำเงินที่มีความยาวคลื่น 428 ถึง 453 nm และช่วงแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่น 661 ถึง 642 nm ตามลำดับ (Lichtenthaler and Buschmann, 2001)

คุณภาพแสง ความเข้มแสง และช่วงแสง ต่อการเจริญเติบโตของพืช

แสงมีผลโดยตรงต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งเป็นกระบวนการพื้นฐานในการสังเคราะห์อาหารของพืช (ลิลลี่, 2546) นอกจากนี้ แสงยังเป็นตัวกระตุ้น และควบคุมรูปแบบการเจริญเติบโต และพัฒนาการต่าง ๆ ของพืชด้วย เช่น การงอก การเคลื่อนที่เข้าหาแสง การเจริญเติบโตของลำต้น และการออกดอก เป็นต้น (Sullivan and Deng, 2003; Kami et al, 2010)

ช่วงความยาวคลื่นแสงที่พืชนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงนั้น อยู่ในช่วงรังสีที่ตามองเห็น ซึ่งประกอบไปด้วยแสงที่มีค่าความถี่หรือความยาวคลื่นต่อเนื่องกัน ได้แก่ แสงสีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม แดง (Aphalo, 2006; Singh et al., 2015) โดยพืชนั้นสามารถดูดกลืนแสงได้มีประสิทธิภาพมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 2 ช่วง คือ ช่วงความยาวคลื่นที่อยู่ระหว่าง 400 ถึง 500 nm ซึ่งเป็นแสงสีน้ำเงิน และช่วงความยาวคลื่นที่อยู่ระหว่าง 600 ถึง 700 nm ซึ่งเป็นช่วงแสงสีแดง (Vanninen et al., 2010) ในขณะที่ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 500 ถึง 600 nm นั้น เป็นช่วงความยาวคลื่นแสงสีเขียว ซึ่งในอดีตถูกมองว่ามีความสำคัญน้อยต่อการเจริญเติบโตของพืช (Van et al., 1977) แต่ในปัจจุบันพบว่า การปลูกผักกาดภายใต้แสงสีเขียว ที่ความเข้มแสงประมาณ $300-500 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ สามารถทำให้ต้นเจริญเติบโตได้เป็นปกติ (Johkan et al., 2012) นอกจากนี้

มีรายงานว่า การให้แสงผสมสีน้ำเงิน แดง และเขียว จากหลอด LED จะช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิด เช่น ต้นผักกาด แดงกวา แรดิช หรือผักโขม ได้มากกว่าการได้รับแสงสีแดงร่วมกับน้ำเงินเท่านั้น (Yorio et al., 2001; Kim et al., 2004; Wang et al., 2009; Lin et al., 2013) แสงสีเขียวมีความสามารถในการทะลุผ่านใบด้านนอกของทรงพุ่มได้ดีกว่าแสงสีน้ำเงิน และแดง อีกทั้งใบพืชที่มีความหนาแน่น เนื้อเยื่อใบชั้นในจะดูดกลืนแสงสีเขียวได้มากกว่าแสงสีน้ำเงิน และแดงอีกด้วย (Sun et al., 1998; Nishio, 2000) ส่งผลให้ใบทั้งหมดที่อยู่ทั้งใน และนอกทรงพุ่มได้รับพลังงานจากแสงสีเขียว ดังนั้นกระบวนการตรึง CO₂ และการเจริญเติบโตโดยรวมของทรงพุ่มก็จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการให้แสงสีเขียวผสมกับแสงสีแดงและน้ำเงิน (Kim et al., 2004; Terashima et al., 2009)

แสงสีน้ำเงิน อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 500 nm มีบทบาทสำคัญต่อการกระบวนการต่างๆ ของพืช เช่น กระตุ้นการออกดอก (Fukuda et al., 2009; Fukuda et al., 2016) ควบคุมการปิดเปิดของปากใบ (Frechilla et al., 2000; Talbott et al., 2002) การคายน้ำของพืช การนำไหลของปากใบ (Muneer et al., 2014) เป็นต้น โดยพืชหลายชนิดจะเปิดปากใบได้กว้างมากขึ้นเมื่อได้รับแสงสีน้ำเงิน (Talbott et al., 2002) อีกทั้งยังปรับตัวให้มีความหนาแน่นของปากใบ และการนำไหลของปากใบเพิ่มขึ้นด้วย (Wang et al., 2009; Muneer et al., 2014; Juwei et al., 2016; Wang et al., 2016) นอกจากนี้แสงสีน้ำเงินยังมีผลยับยั้งการยืดยาวของลำต้น (Xiaoying et al., 2012; Cope and Bugbee, 2013) แต่ในพืชบางชนิดแสงสีน้ำเงินมีผลชักนำให้เกิดการยืดยาวของลำต้น เช่น พืชเนย (Fukuda et al., 2016; Gautam et al., 2015; Akbarian et al., 2016) ต้นกล้ากะหล่ำปลี หรือ แดงกวา (Wang et al., 2015) ในส่วนของการสังเคราะห์แสง พืชหลายชนิดจะมีอัตราการสังเคราะห์แสงสูงขึ้นเมื่อได้รับแสงสีน้ำเงินที่มีความยาวคลื่นประมาณ 450-470 nm (Wang et al., 2009; Xiaoying et al., 2012; Muneer et al., 2014; Wang et al., 2015) จากการศึกษาของ Wang et al (2016) แสดงให้เห็นว่าผักกาดที่ได้รับแสงสีน้ำเงินเป็นเวลา 30 วัน มีอัตราการสังเคราะห์แสงสูงกว่าการได้รับแสงสีแดง

แสงสีแดง อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 600 ถึง 700 nm มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการออกของเมล็ด โดยเมล็ดที่ได้รับแสงสีแดงจะมีเปอร์เซ็นต์การงอกสูง และจะงอกได้เร็วมากขึ้นกว่าปกติ (Borthwick et al., 1952; Burdett, 1972) อีกทั้งมีผลทำให้เกิดการยืดยาวของลำต้น ก้านใบพืช หรือการขยายขนาดใบพืชอีกด้วย (Nhut et al., 2003; Xiaoying et al., 2012; Johkan et al., 2010) นอกจากนี้แสงสีแดงมีผลในการยับยั้งหรือชะลอการออกดอก (Downs and Thomas, 1982; Fukuda, 2013; Hong et al., 2013; Fukuda et al., 2016) เช่น ต้นพืชเนยที่เจริญเติบโตภายใต้แสงสีแดงเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้อายุการออกดอก และการพัฒนาตาดอกช้ากว่าการได้รับแสงสีน้ำเงิน หรือแสงสีขาว (Gautam et al., 2015; Fukuda et al., 2016)

แสงแดงไกล (Far-red) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 700-1000 nm (Singh et al., 2015) มีอิทธิพลต่อการงอกของเมล็ด โดยสามารถยับยั้ง หรือชะลอการงอกของเมล็ดได้ (Borthwick et al., 1952; Piskurewicz et al., 2009) นอกจากนี้ สามารถส่งเสริมให้พืชบางชนิดเจริญเติบโตได้เพิ่มมากขึ้น เช่น ต้นผักกาด หรือ *Crepidiastrum denticulatum* (พืชพื้นเมืองของประเทศเกาหลี) (Lee et al., 2016 ; Bae et al., 2017) อีกทั้งสามารถชักนำให้พืชหลายชนิดออกดอกได้ดีขึ้นด้วย เช่น เบญจมาศ (Craig and Runkle, 2013) พิทูเนีย (Kohyama et al, 2014; Park et al, 2016) ถั่วลิสนิล (Yuan et al, 2017) สตรอว์เบอร์รี (Takeda & Glenn, 2008) เป็นต้น

แสงสีน้ำเงิน และแดงนั้นยังมีปฏิสัมพันธ์ร่วมกันในการควบคุมกระบวนการต่างๆในพืช เช่น มีการศึกษาพบว่า การให้แสงสีแดงอย่างเดียวกับต้นมะเขือเทศ ส่งผลให้มีลักษณะต้นยืดยาว ไม่สมบูรณ์ และมีอัตราการสังเคราะห์แสงต่ำ แต่เมื่อให้แสงสีน้ำเงินร่วมกับแสงสีแดง จะส่งผลให้ต้นมะเขือเทศมีลักษณะต้นปกติ และมีอัตราการสังเคราะห์แสงสูงขึ้น (Yorio et al., 2001; Xiaoying et al., 2012) นอกจากนี้ การให้แสงสีแดงร่วมกับแสงสีน้ำเงินจากหลอด LED โดยให้อัตราส่วนแสงสีแดงต่อแสงสีน้ำเงิน 2 ต่อ 1 พบว่าส่งผลให้ต้นผักกาดหอมเจริญเติบโตมากกว่าการให้แสงด้วยหลอด FL 1.2 เท่า และเมื่อให้แสงสีแดงสลับกับแสงสีน้ำเงิน โดยได้รับแสงแต่ละสีเป็นเวลาเท่ากัน คือ แสงสีแดง 12 ชั่วโมง และแสงสีน้ำเงิน 12 ชั่วโมง พบว่าทำให้ต้นผักกาดหอมสามารถเจริญเติบโตได้มากกว่าการใช้แสง FL ถึง 2.6 เท่า (Shimokawa et al., 2014)

ความเข้มแสงจัดเป็นตัวแปรที่สำคัญอีกหนึ่งตัวแปร ที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช อีกทั้งมีความเกี่ยวข้องกับความคุ้มค่าของการใช้พลังงานอีกด้วย เนื่องจากความเข้มแสงจะแปรผันตรงกับปริมาณการบริโภคกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสงเทียม ยกเว้นการปรับเปลี่ยนความเข้มแสงด้วยการปรับระยะระหว่างพื้นที่ปลูกกับแหล่งกำเนิดแสง โดยวิธีนี้จะทำให้พื้นที่การเจริญเติบโตของพืชแคบลงตามความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกกับพืชหลายชนิด ดังนั้นการให้ความเข้มแสงอย่างเหมาะสมกับพืชจึงต้องพิจารณาทั้งการเจริญเติบโตของพืช และความคุ้มค่าของพลังงานที่ใช้ โดยมีการศึกษาการให้แสงผสมระหว่างสีแดงกับน้ำเงินกับต้นกล้ามะเขือเทศ ที่ความเข้มแสง 50 150 200 300 450 และ 550 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ พบว่า การให้แสงที่ความเข้มแสง 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ มีความคุ้มค่า และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง เนื่องจากต้นมะเขือเทศเจริญเติบโตอย่างสมบูรณ์เทียบเท่ากับการได้รับความเข้มแสงที่ 450 และ 550 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Fan et al., 2013) โดยปกติ การให้แสงแก่พืชในระดับความเข้มของแสงที่เพิ่มขึ้นจากจุดชดเชยแสง (light compensation point คือ จุดที่อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเท่ากับอัตราการหายใจ) ไปเรื่อย ๆ นั้นจะทำให้ อัตราการสังเคราะห์แสงเพิ่มขึ้นสอดคล้องไปตามความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นไปด้วยจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวของแสง (light saturation point) ซึ่ง ณ จุดนี้ การเพิ่มความเข้มแสงจะไม่ส่งผลให้อัตราการสังเคราะห์แสงเพิ่มสูงขึ้นต่อไปอีก (Wang et al., 2016;

Xiaoying et al., 2012) ดังนั้นการให้ความเข้มแสงที่สูงเกินจุดอิ่มตัวแสงจะส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงาน และส่งผลให้พืชเกิดสภาวะเครียดแสงได้ (Ma et al., 2015) อย่างไรก็ตาม พืชแต่ละชนิดจะมีจุดอิ่มตัวของแสงที่แตกต่างกัน (Peri et al., 2009; Rakic et al., 2015) และแปรผันไปตามปริมาณของ CO₂ และอุณหภูมิ (Rakic et al., 2015) นอกจากนี้ คุณภาพแสงที่แตกต่างกันก็ส่งผลให้จุดอิ่มตัวแสงในพืชชนิดเดียวกันแตกต่างกันไปด้วย (Wang et al., 2016; Xiaoying et al., 2012)

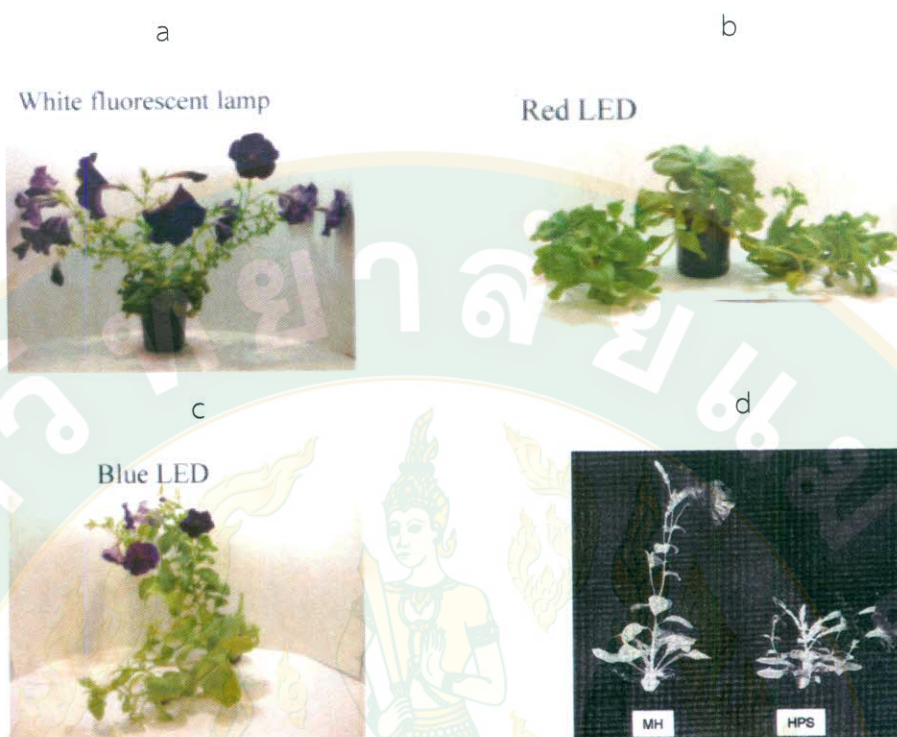
ช่วงแสง (Photoperiod) จัดเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงต่อการเจริญเติบโต และการออกดอก ในส่วนของการเจริญเติบโตทางลำต้น และใบ โดยส่วนมากพืชหลายชนิดจะมีการเจริญเติบโตเพิ่มมากขึ้นเมื่อได้ช่วงแสงที่เพิ่มมากขึ้น เช่น พืชเนี่ย (Adams et al., 1999) คენา (Lefsrud et al., 2006) ถั่วเหลือง (Kasai, 2008) ผักกาดหอม (Shen et al., 2014) หรือมะเขือเทศ (Haque et al., 2015) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การได้รับช่วงแสงที่ยาวมากเกินไป พืชอาจเกิดสภาวะความเครียดแสง ส่งผลให้ลักษณะของใบมีความผิดปกติ หรือเกิดอาการใบเหลืองได้ (Leaf chlorosis) (Murage et al., 1996; Matsuda et al., 2014; Haque et al., 2015) ส่วนการออกดอก พืชหลายชนิดมีความต้องการช่วงแสงที่แตกต่างกันเพื่อกระตุ้นการออกดอก เช่น ต้นสตรอว์เบอร์รี่บางชนิดต้องการช่วงแสงวันสั้นเพื่อกระตุ้นการออกดอก (Ito and Saito, 1962) หรือ ต้นพืชเนี่ยจะออกดอกได้เร็วเมื่อได้รับช่วงแสงเพิ่มมากขึ้น (Adams et al., 1999)

อิทธิพลของแสงเทียมต่อการพัฒนาและการเจริญเติบโตของพืชเนี่ย

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่ศึกษาการตอบสนองของต้นพืชเนี่ยต่อแสงเทียม เช่น มีการศึกษาพบว่า การปลูกต้นพืชเนี่ยภายใต้แสงขาวจากหลอด FL สามารถทำให้ต้นพืชเนี่ยเจริญเติบโต และออกดอกได้เป็นปกติ (ภาพที่ 11a) แต่เมื่อให้แสงสีแดงจากหลอดไฟ LED อย่างเดียวนั้น พบว่ามีผลยับยั้งการยืดตัวของลำต้น และการออกดอก (ภาพที่ 11b) ในขณะที่การให้แสงสีน้ำเงินส่งเสริมการยืดตัวของลำต้น และกระตุ้นการออกดอกของพืชเนี่ย (ภาพที่ 11c) (Fukuda et al., 2009; Fukuda, 2013; Fukuda et al., 2016; Gautam et al., 2015; Akbarian et al., 2016) ฉะนั้นหลอดไฟที่มีส่วนประกอบของแสงสีน้ำเงินมาก เช่น หลอดไฟเมทัลฮาไลด์ (Metal halide; MH) เมื่อนำมาใช้ในการปลูกพืชเนี่ย จะส่งผลให้ลำต้นยืดยาว ซึ่งเป็นลักษณะทรงพุ่มที่ไม่สมบูรณ์ แต่สามารถออกดอกได้เป็นปกติ แต่เมื่อใช้หลอดไฟ HPS ซึ่งเป็นหลอดไฟประเภทเดียวกันกับหลอดไฟ MH แต่มีส่วนประกอบของแสงสีน้ำเงินต่ำกว่า จะสามารถลดการยืดยาวของต้นพืชเนี่ยได้ (ภาพที่ 11d) (Ubukawa et al., 2004) นอกจากคุณภาพแสงแล้ว ความเข้มแสงยังส่งผลต่อการเจริญเติบโต และการออกดอกด้วย เช่น ต้นพืชเนี่ยที่ได้รับความเข้มแสงสูงประมาณ 360 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ มีอัตราการสังเคราะห์แสง และการเจริญเติบโตสูงกว่าต้นที่ได้รับความเข้มแสงประมาณ 120 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

อีกทั้งความเข้มแสงสูงยังชักนำให้เกิดการออกดอกเร็วกว่าการได้รับความเข้มแสงต่ำอีกด้วย (Haliapas et al., 2008) อย่างไรก็ตาม การกำหนดความเข้มแสงที่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืชนั้น ต้องพิจารณาระยะเวลาที่ให้แสงในแต่ละวันด้วย โดยค่าความเข้มแสง และช่วงเวลาที่ให้แสงนั้นสามารถนำมาคำนวณค่า ปริมาณแสงทั้งหมดที่ได้รับในหนึ่งวัน (Daily light integral; DLI) ได้ ซึ่งค่า DLI ที่เหมาะสมกับต้นพืชนั้นอยู่ในช่วง $12\text{--}19 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ โดยต้นพืชนั้นจะเจริญเติบโตและมีน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ DLI เท่ากับ $15 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ และจำนวนดอกสูงสุดที่ DLI เท่ากับ $19 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (Faust et al., 2005; Blanchard et al., 2011)

ในภาพรวมเห็นได้ว่าการศึกษานี้จำนวนมากที่ศึกษาอิทธิพลของความเข้มแสง และคุณภาพแสงในช่วงความยาวคลื่นสั้น เช่น แสงสีน้ำเงิน แสงสีเขียว แสงสีส้ม และแสงสีแดง ต่อการเจริญเติบโตของพืชนั้น ทั้งทางสรีรวิทยา และสรีรวิทยา อย่างไรก็ตาม การศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของแสงในช่วงคลื่นที่กว้าง เช่น แสงสีขาวที่มีอุณหภูมิสีแตกต่างกัน ต่อการเจริญเติบโต ออกดอก และผลิตเมล็ดของต้นพืชนั้นยังไม่พบการรายงาน ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงจะได้ทำการศึกษอิทธิพลของแสงต่อการเจริญเติบโตและการผลิตเมล็ดพันธุ์ของต้นพืชนั้น นอกจากนี้จะได้ทำการศึกษาความคุ้มค่าของการปลูกต้นพืชนั้นในระบบกึ่งปิดเพื่อผลิตเมล็ดพันธุ์



ภาพที่ 11 แสดงลักษณะต้นพืชมิมิซาที่ปลูกภายใต้แสงเทียมที่แตกต่างกัน (a) ต้นพืชมิมิซาที่เจริญเติบโตภายใต้แสงจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ (b) ต้นพืชมิมิซาที่เจริญเติบโตภายใต้แสงสีแดง (c) ต้นพืชมิมิซาที่เจริญเติบโตภายใต้แสงสีน้ำเงิน และ (d) ต้นพืชมิมิซาที่เจริญเติบโตภายใต้แสงหลอดไฟเมทัลฮาไลด์ (MH) และหลอดโซเดียมความดันสูง (HPS)

ที่มา: Ubukawa et al. (2004; Fukuda et al., 2009)

บทที่ 3

อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

การเตรียมพืชทดลอง

นำเมล็ดพันธุ์พืชนี๊ยะจากบริษัทเอ เอฟ เอ็ม ฟลาวเวอร์ซีส์ จำกัด จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย มาเพาะในจานเพาะเชื้อ ด้วยวัสดุปลูก ที่ประกอบด้วย พีทมอส และทรายละเอียด ในอัตราส่วน 1 : 1 (ปริมาตรโดยปริมาตร) นำไปเพาะในสภาพอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และ ความชื้นสัมพัทธ์ $90 \pm 10\%$ ภายใต้แสงจากหลอด LED ($6500\text{ K} : 3200\text{ K}$ อัตราส่วน 1:1) ที่ความเข้มแสง $150\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ โดยให้แสง 16 ชั่วโมงต่อวันเมื่อดันกล้าพืชนี๊ยะมีอายุ 7 วันหลังเพาะเมล็ด ทำการย้ายลงในถาดหลุมเพาะกล้าที่มีวัสดุปลูกเหมือนเดิม พร้อมด้วยสารละลายปุ๋ย Modified Hoagland (Epstein and Bloom, 2005) (ตารางที่ 1) ความเข้มข้น 0.25 เท่า จนชุ่ม เมื่ออายุ 21 วันหลังเพาะเมล็ด ทำการย้ายต้นกล้าพืชนี๊ยะลงในกระถางพลาสติกขนาด 3 นิ้ว (เส้นผ่าศูนย์กลาง 75 mm ความลึก 80 mm) ที่วางอยู่ในถาดสี่เหลี่ยมโดยใช้วัสดุปลูกขุยมะพร้าวพีทมอส และทรายละเอียด (อัตราส่วน 3:1:1) และให้สารละลายปุ๋ย Modified Hoagland ความเข้มข้น 1 เท่า เมื่อดันพืชนี๊ยะอายุ 28 วันหลังเพาะเมล็ด ทำการย้ายต้นพืชนี๊ยะลงในกระถางพลาสติกขนาด 6 นิ้ว (เส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm ความลึก 150 mm) ที่มีส่วนผสมของวัสดุปลูกเหมือนเดิม สภาวะ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ $50 \pm 10\%$ เพาะเลี้ยงต่อไปจนกระทั่งต้นพืชนี๊ยะมีอายุ 35 วันหลังเพาะเมล็ด แล้วทำการย้ายต้นพืชนี๊ยะเข้าการทดลอง

การทดลองที่ 1 การตรวจวัดคุณภาพแสงเชิงสเปกตรัมของหลอด LED

ตรวจวัดสเปกตรัมของแสงหลอด LED ด้วยเครื่อง Spectroradiometer (Manufacturer : Instrument Systems ; Model : CAS140CT-154 (Main unit), EOP-146 (Probe); Serial Number : 104614210 (Main unit), 1046142E1 (Probe)) โดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กำหนดระยะห่างระหว่างหลอด LED กับหัวเซ็นเซอร์วัดแสง คือ 10 cm (ภาพที่ 12) ทำการวัด 20 ชั่วโมงต่อวัน นอกจากนี้ทำการตรวจวัดช่วงความยาวคลื่นแสงที่พืชสามารถนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ (Photosynthetically active radiation ; PAR) ทั้ง 3 ช่วงความยาวคลื่น ได้แก่ 400-500 nm 500-600 nm และ 600-700 nm โดยใช้เครื่อง PAR meter (101EG, Nippon Medical & Chemical Instruments Co., LTD., Japan) โดยกำหนดระยะห่างระหว่างหลอด LED

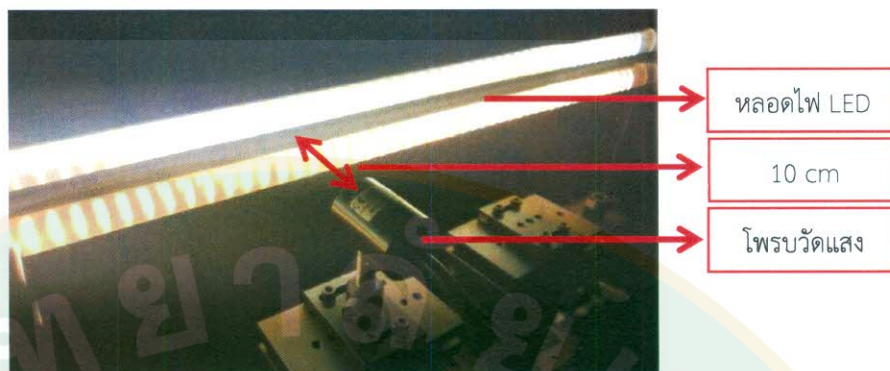
กับหัวเซ็นเซอร์วัดแสง คือ 25 cm ทำการวัด 10 ชั่วโมงต่อวัน (ภาพที่ 13) ซึ่งดำเนินการทดลองทั้งหมดมี 4 ดำรับ ดังนี้

1. หลอด LED ชนิด 6500 K (Day light)
2. หลอด LED ชนิด 3200 K (Warm white)
3. หลอด LED ชนิด 6500 K : 3200 K ในอัตราส่วน 1:1
4. หลอด LED-RB (Red light : Blue light ในอัตราส่วน 2:1)

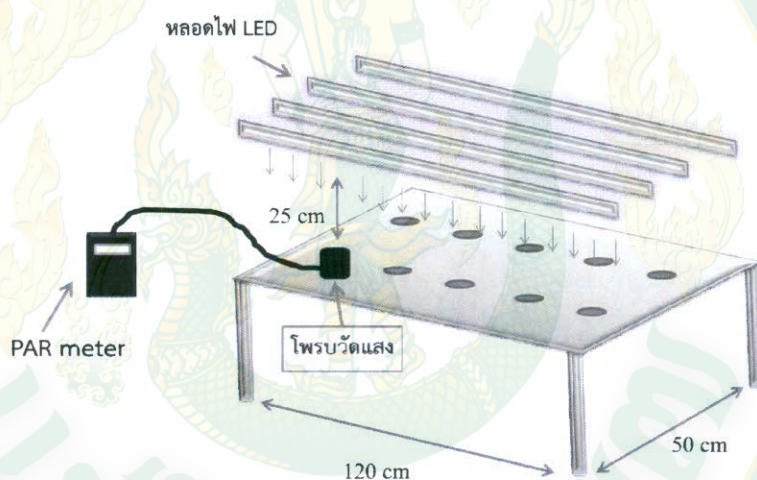
ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของธาตุอาหารในสารละลายปุ๋ย Modified Hoagland

ธาตุอาหาร	g/l
สารละลาย A	
KNO ₃ (Yara Krista-K, Yara Company Ltd; Haifa, Haifa chemicals Ltd.)	60.6
Fe EDTA (Librel-Fe-Lo, Wesco Chemicals Thailand Co.)	3.0
CaNO ₃ (Yara Liva Calcium Nitrate, Yara Co. Ltd. Thailand.)	94.46
สารละลาย B	
NH ₄ H ₂ PO ₄ (Smart-MAP, Y.V.P Fertilizer Ltd.)	23.02
MgSO ₄ (สามต้นไม้ Y.V.P Fertilizer Ltd.)	24.65
H ₃ BO ₃ (Rci Labscan, Rci Labscan Ltd.)	0.15
MnCl ₂ (Univar, Ajax Finechem Pty Ltd.)	0.03
ZnSO ₄ (Rci Labscan, Rci Labscan Ltd.)	0.05
CuSO ₄ (Merck, Genius science co. Ltd.)	0.012
NaMoO ₄ (Carlo Erba reagent, Farmitalia Carlo Erba.)	0.008
KCl (Univar, Ajax Finechem Pty Ltd.)	0.37
NiSO ₄ (Univar, Ajax Finechem Pty Ltd.)	0.013

ที่มา: Epstein and Bloom (2005)



ภาพที่ 12 แสดงลักษณะการตรวจวัดคุณภาพแสงเชิงสเปกตรัมของหลอด LED ด้วยเครื่อง Spectroradiometer



ภาพที่ 13 แสดงลักษณะการตรวจวัดช่วงความยาวคลื่นแสงที่พืชสามารถนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ด้วยเครื่อง PAR meter

การทดลองที่ 2 อิทธิพลของช่วงแสงจากหลอด LED ต่อการเจริญเติบโตของต้นพืชน้ำ

การทดลองที่ 2.1 อิทธิพลของช่วงแสงต่อการเจริญเติบโตทางลำต้น และใบของต้นพืชน้ำในระยะต้นกล้า (ช่วงอายุ 30 วันหลังจากเพาะเมล็ด)

วางแผนการทดลองแบบ CRD (Complete randomized design) จำนวน 15 ซ้ำ โดยนำเมล็ดพันธุ์พืชน้ำมาเพาะในจานเพาะเชื้อด้วยวัสดุปลูก สภาพการเพาะ และความเข้มแสงเหมือนกับวิธีการเตรียมพืชทดลอง โดยให้ช่วงแสงที่แตกต่างกัน 3 ชุดการทดลอง ได้แก่

1.1	สว่าง	8	ชั่วโมง	มืด	16	ชั่วโมง
1.2	สว่าง	12	ชั่วโมง	มืด	12	ชั่วโมง
1.3	สว่าง	16	ชั่วโมง	มืด	8	ชั่วโมง

เมื่อต้นกล้าพิทูเนียมีอายุ 7 วันหลังเพาะเมล็ด ทำการย้ายลงในถาดหลุมเพาะกล้าที่มีวัสดุปลูกเหมือนเดิม พรหมด้วยสารละลายปุ๋ย Modified Hoagland ความเข้มข้น 0.25 เท่า จนชุ่ม เมื่ออายุ 21 วันหลังเพาะเมล็ด ทำการย้ายต้นกล้าพิทูเนียลงในกระถางพลาสติกขนาด 3 นิ้ว (เส้นผ่าศูนย์กลาง 75 mm ความลึก 80 mm) ที่วางอยู่ในถาดสี่เหลี่ยมโดยใช้วัสดุปลูกคือ ขุยมะพร้าวพีทมอส และทรายละเอียด (อัตราส่วน 3:1:1) และให้สารละลายปุ๋ย Modified Hoagland ความเข้มข้น 1 เท่า ปลูกในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ $50 \pm 10\%$ เพาะเลี้ยงต่อไปจนกระทั่งต้นพิทูเนียมีอายุ 35 วันหลังเพาะเมล็ด แล้วทำการตรวจวัดค่าดัชนีทางสัณฐานวิทยา ได้แก่ มวลน้ำหนักสดและมวลน้ำหนักแห้งโดยทำการตรวจวัดทุกสัปดาห์หลังจาก 14 วันหลังจากเพาะเมล็ด และสร้งรวิทยา

การทดลองที่ 2.2 อิทธิพลของช่วงแสงต่อการเจริญเติบโตทางลำต้น ใบ ดอก และผลผลิตเมล็ดของต้นพิทูเนีย

วางแผนการทดลองแบบ CRD จำนวน 5 ซ้ำ โดยเตรียมต้นพิทูเนียเหมือนกับการทดลองที่ 2.1 จนกระทั่งต้นพิทูเนียมีอายุ 35 วันหลังเพาะเมล็ด ทำการย้ายต้นพิทูเนียลงในกระถางพลาสติกขนาด 6 นิ้ว (เส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm ความลึก 150 mm) ที่มีส่วนผสมของวัสดุปลูกเหมือนเดิม ปลูกในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์เป็น $50 \pm 10\%$ ความเข้มแสง $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ เพาะเลี้ยงภายใต้ช่วงแสงที่ต่างกัน 3 ชุดการทดลอง เหมือนกับการทดลองที่ 2.1 เพาะเลี้ยงต่อไปจนกระทั่งออกดอก จึงทำการช่วยผสมเกสรโดยใช้พู่กันปัดละอองเรณูเพศผู้มาผสมกับเกสรเพศเมียเป็นประจำทุกวันตั้งแต่พบการออกดอกแรก จนกระทั่งครบ 1 เดือน จึงหยุดทำการช่วยผสมเกสร จากนั้นเพาะเลี้ยงต่อไปเป็นเวลา 1 เดือน เพื่อให้ดอกที่ถูกผสมเป็นวันสุดท้าย มีการพัฒนาไปเป็นฝักจนกระทั่งเก็บเกี่ยวได้

ทำการตรวจวัดค่าทางสัณฐานวิทยา (การเจริญเติบโตทางลำต้น ใบ ดอก ผลผลิตฝัก และคุณภาพเมล็ด) และสร้งรวิทยาตลอดการทดลอง

การทดลองที่ 3 อิทธิพลของคุณภาพ และความเข้มแสงจากหลอด LED

ต่อการเจริญเติบโตของต้นพืชน้ำ

การทดลองที่ 3.1 อิทธิพลของความเข้ม และคุณภาพแสง (Light response function) ต่อค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซ

นำต้นพืชน้ำที่มีอายุ 60 วันหลังการเพาะเมล็ด ที่ปลูกภายใต้แสงจากหลอด LED (6500 K : 3200 K อัตราส่วน 1:1) ที่ความเข้มแสง $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ มาทำการตรวจวัดค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซภายใต้แสงที่มีคุณภาพแตกต่างกัน 4 ชนิด ดังนี้

1. แสงจากหลอด LED ชนิด 6500 K (Day light)
2. แสงจากหลอด LED ชนิด 3200 K (Warm white)
3. แสงจากหลอด LED ชนิด 6500 K : 3200 K ในอัตราส่วน 1:1
4. แสงจากหลอด LED RB (Red light : Blue light ในอัตราส่วน 2:1)

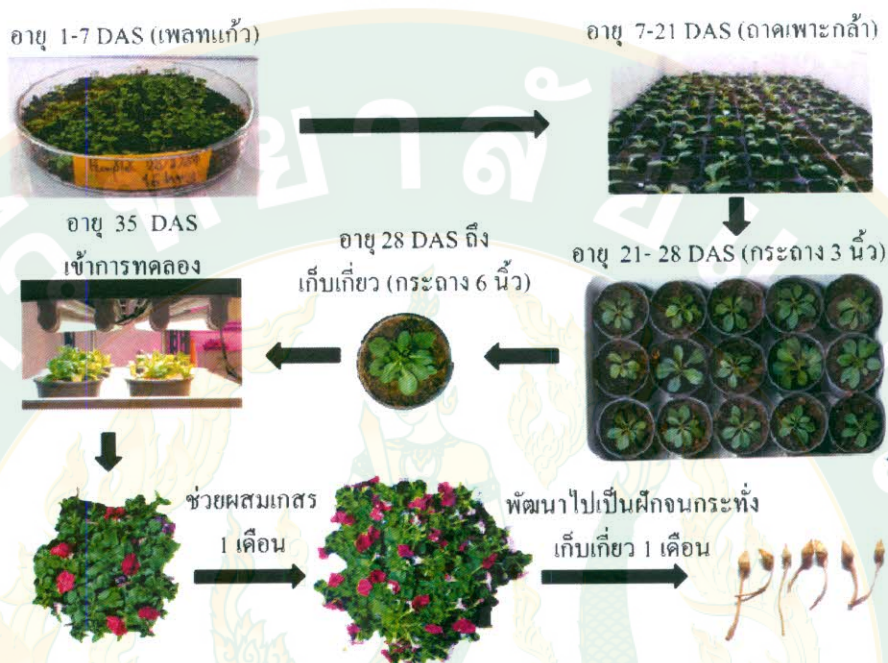
สภาพปลูกมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศที่ $50\pm 10\%$ โดยทำการตรวจวัดค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซที่ระดับความเข้มแสง 50 100 150 200 400 600 800 และ $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ในแต่ละระดับความเข้มแสงทำการตรวจวัด 4 ชั่วโมง นำค่าที่ได้มาทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซภายใต้คุณภาพแสงที่แตกต่างกัน

การทดลองที่ 3.2 อิทธิพลของคุณภาพแสง และความเข้มแสงต่อการเจริญเติบโตทั้งทางด้านสรีรวิทยา และสัณฐานวิทยา

นำต้นพืชน้ำที่มีอายุ 35 วันหลังเพาะเมล็ด มาใช้ในการทดลอง โดยวางแผนการทดลองแบบ CRD ให้คุณภาพแสงที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 8 ชั่วโมง ในแต่ละชุดการทดลองใช้แสงจาก LED เหมือนในการทดลองที่ 3.1 โดยทุกชุดการทดลองให้ความเข้มแสงสองระดับคือ 150 และ $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ให้แสงสว่าง 16 ชั่วโมง มีด 8 ชั่วโมง ให้สารละลายปุ๋ยสูตร Hoagland ความเข้มข้น 0.5 เท่า ในปริมาณที่เท่ากันตลอดการทดลอง โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $50\pm 10\%$

เก็บข้อมูล มวลน้ำหนักรากส่วนลำต้น มวลน้ำหนักรากส่วนลำต้น และมวลน้ำหนักรากส่วนราก โดยตรวจวัดต้นพืชน้ำที่มีอายุ 80 วันหลังเพาะเมล็ด และเก็บข้อมูลดัชนีทางสรีรวิทยา ได้แก่ อัตราการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis ; P_n) ค่าการนำไหลดของปากใบ (Stomatal conductance ; g_s) ค่าประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII (Maximum quantum efficiency ;

F_v/F_m) และปริมาณมาลอนได-แอลดีไฮด์ (Malondialdehyde content ; MDA) ในเนื้อเยื่อใบ โดยเริ่มตรวจวัดที่อายุ 56 63 70 และ 77 วันหลังเพาะเมล็ด



ภาพที่ 14 แสดงกระบวนการเตรียมต้นกล้าพิทูเนีย และการทดลองจนกระทั่งเก็บเกี่ยวผลผลิต

การทดลองที่ 4 อิทธิพลของคุณภาพแสง ต่อการเจริญเติบโต การออกดอก การให้ผลผลิต และคุณภาพเมล็ดพันธุ์ของต้นพิทูเนีย

นำต้นพิทูเนียที่มีอายุ 35 วันหลังเพาะเมล็ด มาใช้ในการทดลอง วางแผนการทดลองแบบ CRD ให้แสงในการทดลองทั้งหมด 4 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 16 ชั่วโมง โดยแต่ละชุดการทดลองใช้แสงจาก LED เหมือนในการทดลองที่ 3.1 โดยให้ความเข้มแสง $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ให้แสงสว่าง 16 ชั่วโมง มีด 8 ชั่วโมง ให้สารละลายปุ๋ยสูตร Hoagland ความเข้มข้น 0.5 เท่า ในปริมาณที่เท่ากันตลอดการทดลอง ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $50\pm 10\%$ โดยเพาะเลี้ยงต่อไปจนกระทั่งออกดอก จึงทำการช่วยผสมเกสรโดยใช้พู่กันปัดละอองเรณูเพศผู้มาผสมกับเกสรเพศเมียเป็นประจำทุกวันตั้งแต่พบการออกดอกแรก จนกระทั่งครบ 1 เดือน จึงหยุดทำการช่วยผสมเกสร จากนั้นเพาะเลี้ยงต่อไปเป็นเวลา 1 เดือน เพื่อให้ดอกที่ถูกผสมเป็นวันสุดท้ายมีการพัฒนาไปเป็นฝักจนกระทั่งเก็บเกี่ยวได้ทำการบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกดอก การให้ผลผลิต ตรวจวัดความมีชีวิตของละอองเรณู และเปอร์เซ็นต์ความงอกของละอองเรณู จากนั้นเก็บเมล็ดพิทูเนีย

ในแต่ละดำรับที่มีอายุหลังการผสมเกสร 25 ถึง 30 วัน เพื่อใช้ในการ ตรวจสอบคุณภาพเมล็ด และ ตรวจวัดมวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น

การวัดระดับมาลอนไดแอลดีไฮด์ (Malondialdehyde content; MDA)

การวัดปริมาณ MDA (Malondialdehyde) ดัดแปลงจากวิธีของ Velikova & Loreto (2005) โดยนำตัวอย่างใบมาทำการตัดเป็นแผ่นวงกลมระหว่างเส้นใบให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 cm และนำไปชั่งน้ำหนักให้ได้ประมาณ 0.05 กรัม บดให้ละเอียดด้วย 0.5 มิลลิลิตร ของ สารละลาย Trichloroacetic acid 0.1% (W/V) จากนั้นเติม Trichloroacetic acid 0.1% (W/V) 0.5 มิลลิลิตรทำการปั่นเหวี่ยงที่ 12,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง นำ สารละลายส่วนใส (Supernatant) 0.5 มิลลิลิตร มาผสมกับ Thiobarbituric acid (0.5% ผสมใน 20% (W/V) Trichloroacetic acid) 1 มิลลิลิตร แล้วนำสารผสมที่ได้ไปต้มที่ 80 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 25 นาที จากนั้นรอให้เย็น แล้วปั่นเหวี่ยงที่ 7,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที นำสารละลาย ที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 3 ระดับ ได้แก่ 440, 532, 600 nm ตามลำดับ แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณ MDA โดยใช้สูตร ดังนี้

$$\text{MDA } (\mu\text{mol/g FW}) = \frac{(A_{532} - A_{600}) - [(A_{440} - A_{600}) \times (8.4/147)] \times 1,000,000}{157,000}$$

ภาพที่ 15 แสดงสมการคำนวณปริมาณ MDA

การวัดปริมาณคลอโรฟิลล์

วัดปริมาณคลอโรฟิลล์โดยทำการเจาะใบเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 cm จำนวน 5 ชิ้น ใส่ในหลอดไมโครทิวป์ (Micro tube) ทำการชั่งน้ำหนักใบสด แล้วเติมไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide; DMSO) 1 ml จากนั้นนำไปบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทั้งหลอดไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที แล้วนำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ ความยาวคลื่น 645 และ 663 nm ทำการคำนวณหาปริมาณคลอโรฟิลล์โดยใช้สูตร ดังนี้ (Hiscox and Israelstam, 1979)

$$\text{Chlorophyll a (g/l)} = 0.0127A_{663} - 0.00269 A_{645}$$

$$\text{Chlorophyll b (g/l)} = 0.0229A_{645} - 0.00468 A_{663}$$

$$\text{Total chlorophyll content} = \text{Chlorophyll a} + \text{Chlorophyll b}$$

การวัดเปอร์เซ็นต์ความงอก และความมีชีวิตของเรณู

การวัดเปอร์เซ็นต์ความงอกของเรณูของพืชเนี่ยทำโดยนำเรณูจากเกสรตัวผู้ที่แตกออกเต็มที่ มาทดสอบความงอกด้วยวิธี Hanging Drop โดยใช้สารละลายตัวกลางจากสูตรของ Brewbaker and Kwack (1963) ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

Sucrose	10 %
H ₃ BO ₃	100 ppm
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	300 ppm
MgSO ₄ · 7H ₂ O	200 ppm
KNO ₃	100 ppm

โดยเตรียมสารละลาย Sucrose 10 % แยกออกมาจากสารอื่น ๆ (สารละลาย Sucrose) ส่วนที่เหลือ เตรียมไว้ในขวดเดียวกัน (สารละลายธาตุอาหาร) จากนั้นนำเรณูกระจายลงบนสไลด์ แล้วทำการหยดสารละลาย Sucrose และสารละลายธาตุอาหาร อย่างละ 20 µl ลงบนเรณู แล้วทำการผสมให้เข้ากัน จากนั้นคว่ำสไลด์เพื่อให้เกิดหยดแขวนของสารละลายที่มีเรณู นำไปวางในจานแก้วที่มีกระดาษกรองชุ่มด้วยน้ำเพื่อรักษาความชื้น ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาตรวจสอบความงอก ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40 เท่า เป็นจำนวน 5 จุด โดยนับเรณูที่มี ความยาวของท่อเรณู มากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของเรณู แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความงอกของเรณู (Kapyla, 1991)

การวัดเปอร์เซ็นต์ความมีชีวิตของเรณู เตรียมเรณูลงบนสไลด์ แล้วทำการหยดสารละลาย สีแดงของอะซีโตคามีนความเข้มข้น 1 % ปริมาณ 40 µl ลงบนเรณู ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในจานแก้วที่มีกระดาษกรองชุ่มด้วยน้ำเพื่อรักษาความชื้น แล้วนำมาตรวจสอบความงอก ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40 เท่า เป็นจำนวน 5 จุด โดยนับเรณูที่มีลักษณะกลม ไม่บิดเบี้ยว และติดสีแดงอย่างชัดเจน แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความงอกของเรณู (Calic et al., 2013)

การวัดเปอร์เซ็นต์ความงอกของเมล็ด และค่าเฉลี่ยจำนวนวันที่ใช้ในการงอก

เตรียมเมล็ดพืชเนี่ย 200 เมล็ด ที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 5-10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน โดยแบ่งออกเป็น 4 ซ้ำ ๆ ละ 50 เมล็ด ทำการกระจายเมล็ดลงบนแผ่นกระดาษเพาะ เมล็ดที่ชุ่มไปด้วย 0.2 % (W/W) KNO₃ ในเพลทที่มีฝาปิด แล้วนำไปวางใต้หลอดไฟ 6500 K : 3200 K ที่ความเข้มแสง 100 µmol·m⁻²·s⁻¹ ทำการตรวจนับการเพิ่มขึ้นของเมล็ดที่มีความยาวรากประมาณ 2 mm ทุกวัน จนกระทั่งครบ 14 วัน ทำการตรวจนับเมล็ดที่งอก และพัฒนาเป็นใบเลี้ยงที่สมบูรณ์

และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความงอก (McDonald and Kwong, 2005) และ ค่าเฉลี่ยจำนวนวันที่ใช้ในการงอก (Mean germination time ; MGT) (Demir et al., 2008) ดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความงอก} = \frac{\text{จำนวนเมล็ดที่งอก} \times 100}{\text{จำนวนเมล็ดทั้งหมด}}$$

$$\text{MGT} = \frac{\sum(nT)}{\sum n}$$

n = จำนวนต้นกล้าปกติที่งอกในวันที่ตรวจนับ

T = อายุวันที่ตรวจนับ

$\sum n$ = จำนวนต้นกล้าปกติที่งอกทั้งหมด

การวัดความแข็งแรง และความชื้นของเมล็ด

เตรียมเมล็ดพิทูเนีย 400 เมล็ด แบ่งออกเป็น 2 ชุด ๆ ละ 200 เมล็ด แต่ละชุดทำการแบ่งออกเป็น 4 ซ้ำ ๆ ละ 50 เมล็ด นำเมล็ดแต่ละชุดห่อด้วยผ้าขาวบาง แล้วนำไปบ่มในกล่องพลาสติกที่มีฝาปิดสนิท และสภาวะอากาศที่อึดตัวด้วยน้ำเปล่า ที่อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเมล็ดชุดที่ 1 มากระจายเมล็ดลงบนแผ่นกระดาษเพาะเมล็ดที่ชุ่มไปด้วย 0.2 % (W/W) KNO_3 ในเพลทที่มีฝาปิด (Rodo et al., 2003) แล้วนำไปวางใต้หลอดไฟ 6500 K : 3200 K ที่ความเข้มแสง $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ทำการตรวจนับการเพิ่มขึ้นของเมล็ดที่มีความยาวรากประมาณ 2 mm ทุกวัน จนกระทั่งครบ 14 วัน ทำการตรวจนับเมล็ดที่งอก และพัฒนาเป็นใบเลี้ยงที่สมบูรณ์ และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความงอก และ MGT ส่วนเมล็ดอีกชุดหนึ่งนำไปตรวจวัดความชื้นเมล็ด โดยนำเมล็ดมาชั่งน้ำหนักสด จากนั้นทำการอบด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง นำค่าที่ได้ไปคำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้นในเมล็ด ดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นเมล็ด} = \frac{\text{น้ำหนักสด} - \text{น้ำหนักแห้ง} \times 100}{\text{น้ำหนักสด}}$$

การวัดปริมาณโปรตีนในเมล็ด

ทำการเตรียมกราฟมาตรฐานโดยใช้โปรตีนมาตรฐาน คือ BSA (Bovine Serum Albumin) ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 mg/ml โดยแต่ละความเข้มข้นมีปริมาตรรวม 100 μ l แล้วทำการเติมสารละลาย Bradford (เตรียมโดยชั่ง Coomassie brilliant blue G-250 ปริมาณ 0.05 g ละลายใน Ethanol ความเข้มข้น 95% ปริมาตร 50 ml จากนั้นเติม Ortho-Phosphoric acid ความเข้มข้น 85% ปริมาตร 100 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำเปล่าจนครบ 1000 ml) 3 ml เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 nm จากนั้นนำค่าที่ไปสร้างกราฟมาตรฐานและสมการความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการคำนวณหาโปรตีนในเมล็ดพิทูเนีย

ทำการเตรียมเมล็ดพิทูเนีย 0.01 g แล้วนำไปบดให้ละเอียดด้วยแท่งแก้วในหลอดไมโครทิวบ์ ขนาด 1.5 ml แล้วเติมสารละลายโซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 50 mmol/L (pH 7.8) ปริมาตร 1 ml ที่ผสมด้วย EDTA (Ethylenediamine tetraacetic acid) 1 mmol/L และ PVP (Polyvinylpyrrolidone) 2 % แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 13000 rpm เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นมาส่วนใสมา 10 μ l ผสมกับน้ำ 90 μ l แล้วทำการเติม สารละลาย Bradford 3 ml เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 nm จากนั้นนำค่าไปแทนในสมการมาตรฐานเพื่อคำนวณหาปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Zhang et al., 2007)

การวัดดัชนีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแลกเปลี่ยนก๊าซ

ทำการตรวจวัดอัตราการสังเคราะห์แสง (Net photosynthetic rate; A) อัตราการนำไพลของปากใบ (Stomata conductance; g_s) และอัตราการคายระเหยของน้ำ (Transpiration rate; E) โดยเลือกเก็บข้อมูลในใบอ่อนที่มีขนาดใหญ่ที่สุด ในช่วงเวลา 9.00-12.00 นาฬิกา และช่วงเวลา 13.00-16.00 นาฬิกา โดยใช้เครื่อง LCi-SD (BioScientific Ltd., Hertfordshire, UK)

การวัดค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการเรืองแสงของคลอโรฟิลล์

ทำการตรวจวัดประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของระบบแสงที่สอง (Maximum quantum efficiency of PSII หรือ F_v/F_m) โดยเลือกเก็บข้อมูลในใบอ่อนที่เจริญเต็มที่ ในช่วงเวลา 9.00-12.00 นาฬิกา และช่วงเวลา 13.00-16.00 นาฬิกาโดยใช้เครื่อง Fluorescence Monitoring System

FMS2 (Hansatech Instruments Ltd., UK) และทำการคำนวณหาค่าอัตราการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (Electron Transport Rate; ETR) โดยใช้สูตร ดังนี้

$$\text{อัตราการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR)} = I \times \Phi_{\text{PSII}} \times 0.85 \times 0.5 \quad (\text{Rakic et al., 2105})$$

I = ความเข้มแสง ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Φ_{PSII} = ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของระบบแสงที่สอง (Maximum quantum efficiency of PSII)

0.85 = ค่าการดูดกลืนพลังงานแสงของใบ

0.5 = สัดส่วนของพลังงานแสงที่ถูกดูดกลืนโดยระบบ PSII พืช C3

การวัดประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสง (Energy use efficiency; EUE)

แบ่งการวัดประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. ประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงเพื่อการเจริญเติบโตทางลำต้น และใบ (EUE for plant growth) (Fan et al., 2013) โดยคำนวณดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{EUE for plant growth (gDW/kw)} = \frac{\text{มวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น (gDW)}}{\text{ผลรวมของกำลังไฟ LED (กิโลวัตต์)}}$$

2. ประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงเพื่อผลิตเมล็ดพันธุ์ (EUE for seeds production) (ดัดแปลงจาก Fan et al., 2013) โดยคำนวณดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{EUE for seeds production (seeds/kw)} = \frac{\text{จำนวนเมล็ดต่อต้น}}{\text{ผลรวมของกำลังไฟ LED (กิโลวัตต์)}}$$

การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทั้งทางเดียว สองทาง สามทาง (One-Way, Two-Way and Three-Way Analysis of Variance, ANOVA) การวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบ Pearson และการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ของพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษา เปรียบเทียบ

ค่าเฉลี่ย และตรวจสอบความแตกต่างของเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยโปรแกรม SPSS เวอร์ชัน 16 ผลิตโดยบริษัท SPSS Inc.

สถานที่ดำเนินงานวิจัย

ทำการศึกษาทดลองปลูกต้นพื้ในสภาวะควบคุมปัจจัยแวดล้อมภายใต้แสงจากหลอด LED ณ ห้องควบคุมสภาพแวดล้อม สาขาพืชผัก คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

ระยะเวลาในการวิจัย

ทำการศึกษาทดลองตั้งแต่เดือนสิงหาคม ปีการศึกษา 2557 ถึงเดือนธันวาคมปีการศึกษา 2559



บทที่ 4

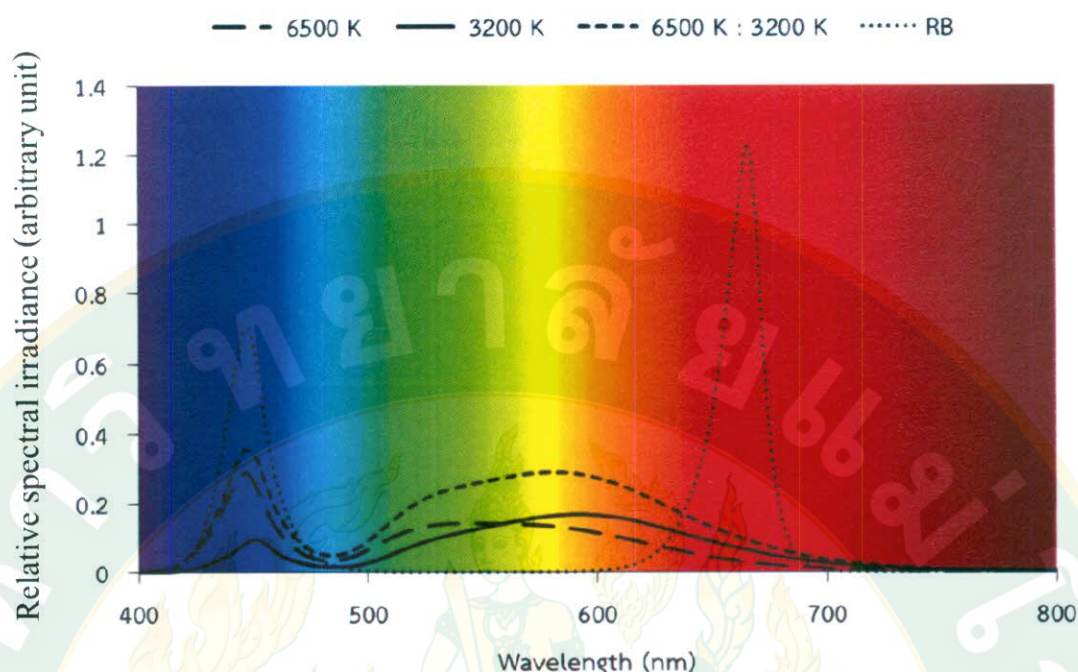
ผลการทดลอง

การทดลองที่ 1 การตรวจวัดคุณภาพแสงเชิงสเปกตรัมของหลอด LED

จากการตรวจวัดสเปกตรัมของแสงหลอดแอลอีดีทั้ง 4 ตัว พบว่า เส้นกราฟมีลักษณะเป็นลูกคลื่น 2 ลูก โดยตัวที่เป็นแสงขาวของ 6500 K 3200 K และ 6500 K : 3200 K มีลูกคลื่นที่ 1 อยู่ในช่วงแสงสีน้ำเงิน (400-500 nm) และลูกคลื่นที่ 2 อยู่ในช่วงแสงตั้งแต่สีเขียวไปถึงสีแดงไกล (500-800 nm) ส่วนตัวรับ RB มีลูกคลื่นที่ 1 อยู่ในช่วงแสงสีน้ำเงินเหมือนกับตัวรับแสงขาว ในขณะที่ลูกคลื่นที่ 2 จะพบเฉพาะช่วงแสงสีแดงเท่านั้น (600-700 nm) (ภาพที่ 16)

รูปแบบของเส้นกราฟของลูกคลื่นที่ 1 ทั้ง 4 ตัว พบว่า มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ในขณะที่ลูกคลื่นที่ 2 มีรูปแบบของเส้นกราฟที่แตกต่างกัน โดยตัวรับ 6500 K มีลักษณะเส้นโค้งของกราฟค่อนข้างสูงเป็นส่วนใหญ่ ในทางกลับกันตัวรับ 3200 K มีลักษณะเส้นโค้งของกราฟค่อนข้างต่ำ และแดงเป็นส่วนใหญ่ ส่วนตัวที่มีการผสมแสงระหว่าง 6500 K กับ 3200 K มีเส้นโค้งของกราฟค่อนข้างสูงเป็นส่วนใหญ่เหมือนกับตัวรับ 6500 K และค่อนข้างต่ำเป็นส่วนใหญ่เหมือนกับตัวรับ 3200 K ในขณะที่ตัวรับ RB จะพบเส้นโค้งของกราฟเฉพาะแสงสีน้ำเงิน กับแสงสีแดงเท่านั้น (ภาพที่ 16) นอกจากนี้แสงจาก LED ทุกตัวไม่พบแสงในช่วงรังสียูวี แต่พบแสงช่วงแดงไกล (Far-red) ในช่วงความยาวคลื่น 700 – 800 nm เล็กน้อย (ภาพที่ 16 ภาพที่ 17 และตารางที่ 3)

จากการวิเคราะห์จุดสูงสุด (Peak wavelength) ของเส้นกราฟในแต่ละตัว พบว่า ลูกคลื่นที่ 1 ของ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB มีค่าใกล้เคียงกันคือ 446.44 450.64 447.28 และ 446.88 โดยตัวรับ 3200 K มีจุดสูงสุดของเส้นกราฟที่มีความยาวคลื่นมากกว่าในตัวอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คือ 450.64 nm ส่วนลูกคลื่นที่ 2 พบจุดสูงสุดที่ค่อนข้างแตกต่างกัน ซึ่งตัวที่เป็นแสงขาวจะพบจุดสูงสุดอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ 500 – 600 nm โดยตัวรับ 6500 K 3200 K และ 6500 K : 3200 K มีจุดสูงสุดของเส้นกราฟที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คือ 544.69 591.17 และ 580.70 nm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ตัวรับ 6500 K มีจุดสูงสุดของลูกคลื่นที่ 2 อยู่ในช่วงแสงสีเขียว ในขณะที่ตัวรับ 3200 K และ 6500 K : 3200 K มีจุดสูงสุดของลูกคลื่นที่ 2 อยู่ในช่วงแสงสีเหลือง และส้ม ส่วนตัวรับ RB มีจุดสูงสุดของลูกคลื่นที่สองเฉพาะในช่วงแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่น 664.89 nm เท่านั้น (ภาพที่ 16 และตารางที่ 2)



ภาพที่ 16 แสดงลักษณะเส้นกราฟของแสงจากหลอด LED ทั้ง 4 ตัวรับ ($n=20$)

หมายเหตุ	400-450 nm	คือ แสงสีม่วง
	450-500 nm	คือ แสงสีน้ำเงิน
	500-570 nm	คือ แสงสีเขียว
	570-590 nm	คือ แสงสีเหลือง
	590-610 nm	คือ แสงสีส้ม
	610-760 nm	คือ แสงสีแดง
	760-1000 nm	คือ แสงแดงไกล

ที่มา: Gupta and Jatothu (2013; Singh et al., 2015)

การวิเคราะห์พื้นที่ใต้กราฟของแสง LED ทั้ง 4 ตัวรับ แสดงให้เห็นว่า ช่วงความยาวคลื่น 400-500 nm ของตัวรับ RB มีค่าร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และค่าร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟจะลดต่ำลงมาเป็นลำดับอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตั้งแต่ตัวรับ 6500 K 6500 K : 3200 K และ 3200 K นอกจากนี้ ตัวรับที่เป็นแสงขาว 6500 K 3200 K และ 6500 K : 3200 K มีค่าร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟในช่วงความยาวคลื่น 500-600 nm ใกล้เคียงกัน คือ 47.32 47.72 และ 47.77 % ตามลำดับ ในขณะที่ตัวรับ RB ไม่มีช่วงความยาวคลื่น 500-600 nm เป็นส่วนประกอบ

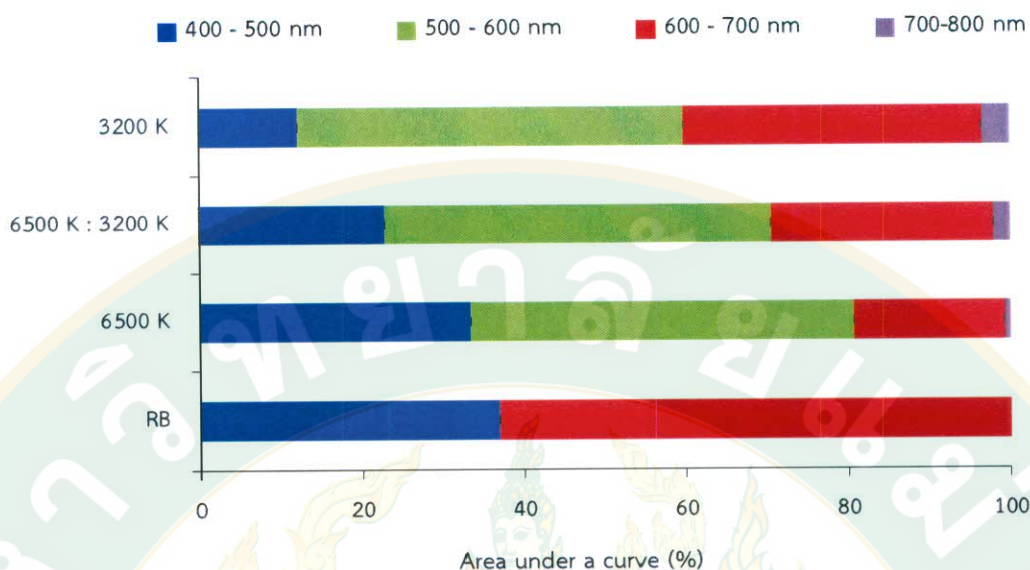
ส่วนช่วงความยาวคลื่น 600-700 nm พบว่า ตำรับ RB มีค่าร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และค่าร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟจะลดต่ำลงมาเป็นลำดับอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตั้งแต่ตำรับ 3200 K 6500 K : 3200 K และ 6500 K นอกจากนี้ ตำรับแสงขาวนั้น พบช่วงความยาวคลื่น 700-800 nm เป็นส่วนประกอบด้วย โดยตำรับ 3200 K มีค่าร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 2 และภาพที่ 17)

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวของค่าจุดสูงสุดเส้นกราฟของแสง LED ในลูกคลื่นที่ 1 และ 2 ของทั้ง 4 ตำรับ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE (n=20) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ในแต่ละคอลัมน์ ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

Treatment	Peak wavelength (nm)	
6500 K	446.44 $\pm$ 0.29 d	544.69 $\pm$ 1.18 d
3200 K	450.64 $\pm$ 0.36 a	591.17 $\pm$ 1.01 b
6500 K : 3200 K	447.28 $\pm$ 0.25 b	580.70 $\pm$ 1.28 c
RB	446.88 $\pm$ 0.48 c	664.89 $\pm$ 0.73 a

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวของค่าร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของแสง LED ทั้ง 4 ตำรับ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE (n=20) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ในแต่ละคอลัมน์ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

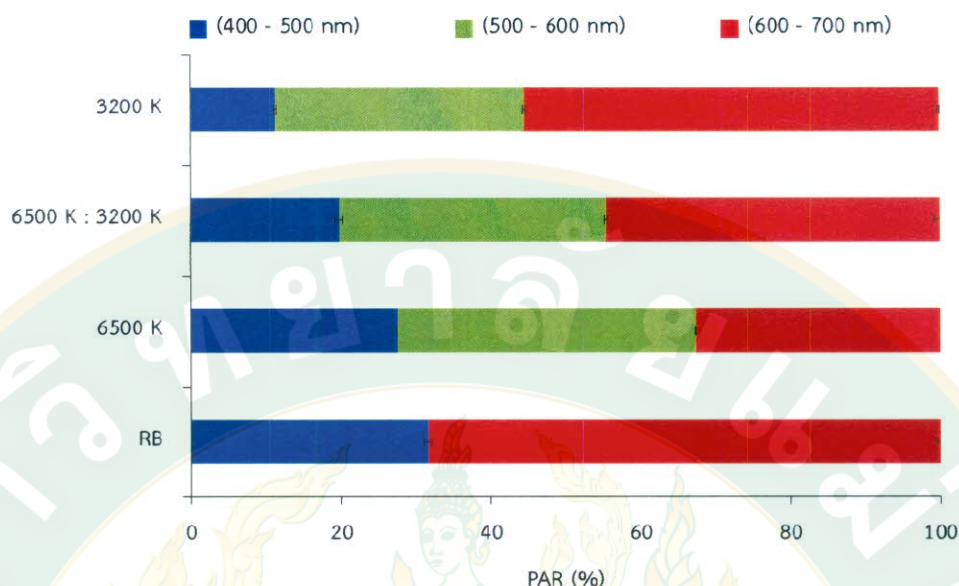
Treatment	Area under a curve (%)			
	(400-500 nm)	(500-600 nm)	(600-700 nm)	(700-800 nm)
3200 K	12.10 $\pm$ 0.02 d	47.72 $\pm$ 0.01 b	36.82 $\pm$ 0.01 b	3.36 $\pm$ 0.01 a
6500 K : 3200 K	22.79 $\pm$ 0.01 c	47.77 $\pm$ 0.02 a	27.36 $\pm$ 0.00 c	2.07 $\pm$ 0.00 b
6500 K	33.39 $\pm$ 0.01 b	47.32 $\pm$ 0.02 c	18.55 $\pm$ 0.00 d	0.74 $\pm$ 0.00 c
RB	36.95 $\pm$ 0.08 a	0.00	63.05 $\pm$ 0.08 a	0.00



ภาพที่ 17 การเปรียบเทียบค่าร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟของแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงิน (400-500 nm) ช่วงความยาวคลื่นแสงสีเขียว (500-600 nm) ช่วงความยาวคลื่นแสงสีแดง (600-700 nm) และช่วงความยาวคลื่นแสงแดงไกล (700-800 nm) ของแสง LED ทั้ง 4 ดำรับ (n=20)

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวของค่าร้อยละของ PAR ทั้ง 4 ดำรับ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE (n=10) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ในแต่ละคอลัมน์ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

Treatment	PAR (%)		
	(400-500 nm)	(500-600 nm)	(600-700 nm)
3200 K	11.27 $\pm$ 0.09 d	33.19 $\pm$ 0.14 c	55.34 $\pm$ 0.17 b
6500 K : 3200 K	19.28 $\pm$ 0.14 c	35.56 $\pm$ 0.15 b	44.49 $\pm$ 0.18 c
6500 K	27.43 $\pm$ 0.01 b	39.92 $\pm$ 0.01 a	32.64 $\pm$ 0.01 d
RB	31.65 $\pm$ 0.47 a	0.00	68.30 $\pm$ 0.37 a



ภาพที่ 18 การเปรียบเทียบค่าร้อยละของ PAR ในช่วงความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงิน (400-500 nm) ช่วงความยาวคลื่นแสงสีเขียว (500-600 nm) และช่วงความยาวคลื่นแสงสีแดง (600-700 nm) ของแสง LED ทั้ง 4 ดำรับ (n=10)

จากการวิเคราะห์ค่า PAR ในช่วงความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงิน เขียว และแดง พบว่า LED ทั้ง 4 ดำรับ มีค่าร้อยละของ PAR (ภาพที่ 17) เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟ (ภาพที่ 18) โดยดำรับ RB มีค่าร้อยละของ PAR ในช่วงแสงสีน้ำเงิน (400-500nm) สูงสุด และดำรับ 3200K มีค่าร้อยละของ PAR ต่ำสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนช่วงแสงสีเขียว (500-600nm) ในดำรับที่เป็นแสงขาวจะมีค่าร้อยละของ PAR ใกล้เคียงกัน และช่วงแสงสีแดง (600-700 nm) พบค่าร้อยละของ PAR ในดำรับ RB สูงสุด ส่วนดำรับที่เป็นแสงขาว จะมีค่าร้อยละของ PAR ในดำรับ 3200 K สูงสุด และจะมีค่าร้อยละของ PAR ต่ำสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในดำรับ 6500 K (ตารางที่ 4 และภาพที่ 18)

การทดลองที่ 2 อิทธิพลของช่วงแสงจากหลอด LED ต่อการเจริญเติบโตของต้นพืชน้ำ

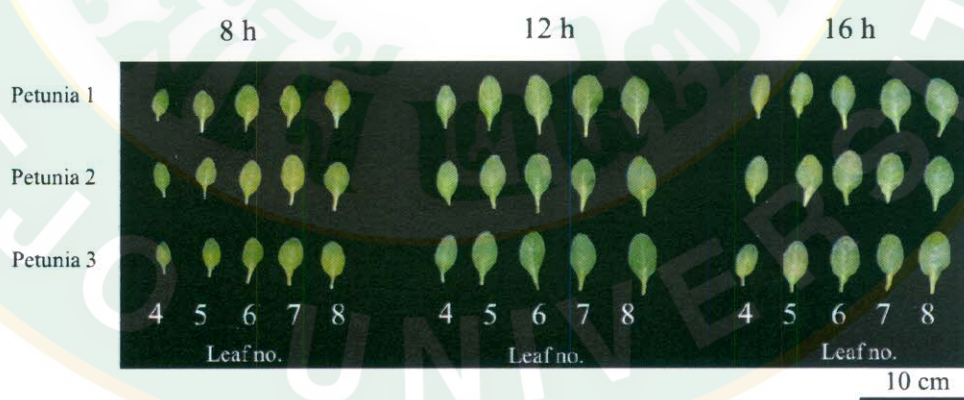
การทดลองที่ 2.1 อิทธิพลของช่วงแสงต่อการเจริญเติบโตทางลำต้น และใบของต้นพืชน้ำในระยะต้นกล้า (ช่วงอายุ 30 วันหลังจากเพาะเมล็ด)

ในการศึกษาต้นพืชน้ำที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันทั้ง 3 ช่วง เป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด พบว่า พืชน้ำได้รับช่วงแสง 16 h มีความกว้าง และความสูงของทรงพุ่ม จำนวนใบ พื้นที่ใบ และจำนวนยอดสูงกว่าการได้รับช่วงแสง 12 h และ 8 h อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 5 ภาพที่ 19)

และภาพที่ 20) นอกจากนี้พบว่า มวลน้ำหนักราก และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น (ภาพที่ 21) และ มวลน้ำหนักแห้งส่วนราก (ภาพที่ 22a) ของต้นที่ได้รับช่วงแสง 16 h ที่ช่วงอายุ 42 วันหลังจากเพาะ เมล็ดสูงกว่าการได้รับช่วงแสง 12 h และ 8 h อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่สัดส่วนมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้นต่อมวลน้ำหนักแห้งส่วนรากของทุกช่วงแสงไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ภาพที่ 22b) เมื่อทำการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างช่วงแสงกับอายุต่อมวลน้ำหนักราก และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น พบว่า ช่วงแสงส่งผลให้มวลน้ำหนักราก และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้นในแต่ละช่วงอายุพืช มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอย่างยิ่งยวด (ตารางที่ 6)



ภาพที่ 19 ลักษณะต้น และรากของพิทูเนียที่มีอายุ 35 วันหลังจากเพาะเมล็ด โดยได้รับชั่วโมงแสง ที่แตกต่างกัน 3 ช่วง คือ 8 12 และ 16 ชั่วโมงต่อวัน



ภาพที่ 20 ลักษณะใบของพิทูเนียที่มีอายุ 35 วันหลังจากเพาะเมล็ด โดยได้รับช่วงแสงที่แตกต่างกัน 3 ช่วง คือ 8 12 และ 16 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งในแต่ละช่วงแสงแสดงตัวอย่างใบที่ได้มาจากต้นพิทูเนีย 3 ต้น (Petunia 1 2 และ 3) ในแต่ละต้นถูกเก็บตัวอย่างมา 5 ใบ โดยใบแรก คือ ใบลำดับที่ 4 จากยอดบนสุดของต้นพิทูเนีย

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวของความกว้าง และความสูงของทรงพุ่ม จำนวนใบ พื้นที่ใบ และจำนวนยอดของต้นพืทุเนยที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ในแต่ละคอลัมน์ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

Photoperiods	Canopy height (cm) (n=6)	Canopy width (cm) (n=6)	Leaf number (n=3)	Leaf area (cm ²) (n=4)	Side shoots number (n=3)
8 h	8.22 $\pm$ 0.03 c	8.22 $\pm$ 0.15 c	9.5 $\pm$ 0.33 c	4.82 $\pm$ 0.36 c	4.5 $\pm$ 0.33 c
12 h	11.95 $\pm$ 0.13 b	11.95 $\pm$ 0.22 b	15.5 $\pm$ 0.88 b	6.63 $\pm$ 0.33 b	7.0 $\pm$ 0.33 b
16 h	12.60 $\pm$ 0.16 a	12.60 $\pm$ 0.13 a	21.5 $\pm$ 0.88 a	7.52 $\pm$ 0.33 a	9.5 $\pm$ 0.33 a

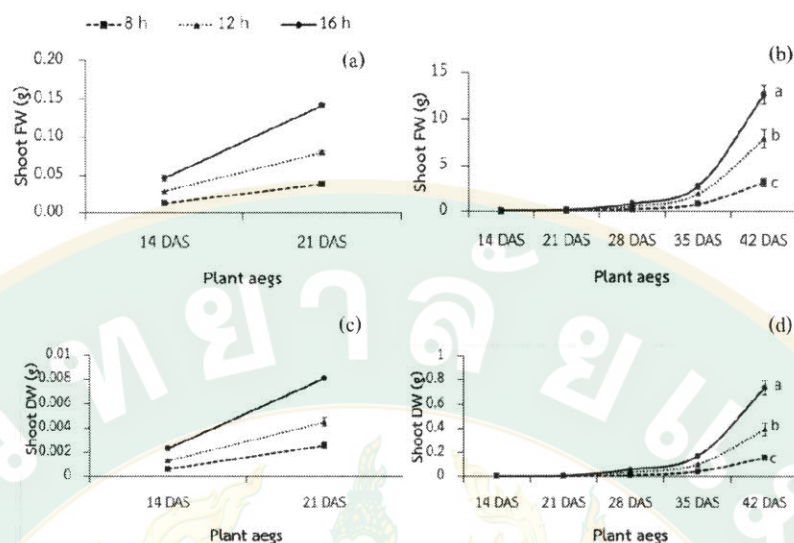
ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวของช่วงแสง (A) อายุพืช (B) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกสองทางของช่วงแสงกับอายุพืช (A $\times$ B) ที่มีผลต่อมวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น (n=4) ตัวเลขในตารางแสดงค่า P (p-value)

Dependent variables	Independent variables		
	Photoperiods (A)	Time (B)	A $\times$ B
FW	>0.01**	>0.01**	>0.01**
DW	>0.01**	>0.01**	>0.01**

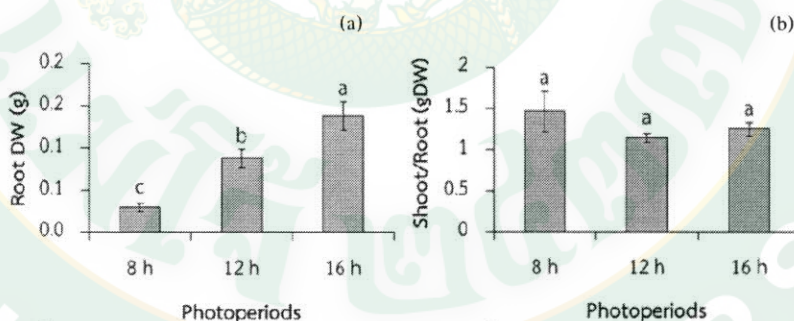
หมายเหตุ **แสดงอิทธิพลของตัวแปรต้นต่อตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง

*แสดงอิทธิพลของตัวแปรต้นต่อตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญ

NS (Non-significant) หมายถึง ตัวแปรต้นไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม



ภาพที่ 21 การเจริญเติบโตของต้นพืชน้ำในแต่ละช่วงอายุ ภายใต้การได้รับช่วงแสงที่ต่างกัน 3 ช่วง คือ 8 12 และ 16 ชั่วโมงต่อวัน a และ c คือ มวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้นตามลำดับ ของช่วงอายุ 14 และ 21 วันหลังเพาะเมล็ด b และ d คือ มวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้นตามลำดับ ตั้งแต่ช่วงอายุ 14 ถึง 42 วันหลังเพาะเมล็ด เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่อายุ 42 วันหลังเพาะเมล็ด $\pm$ SE (n=4) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

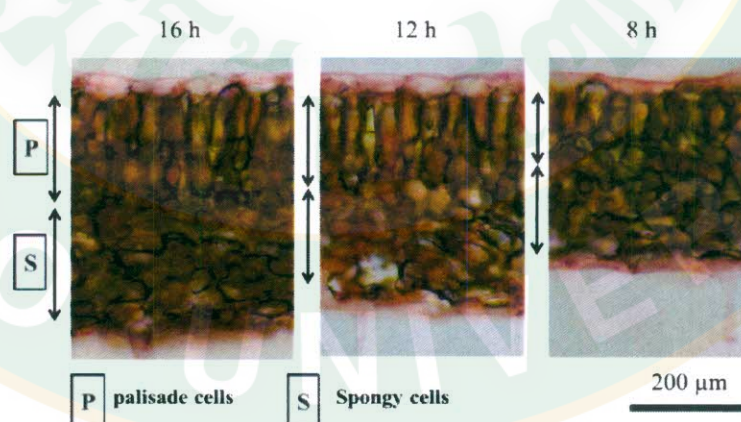


ภาพที่ 22 น้ำหนักแห้งส่วนราก (a) และสัดส่วนมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้นต่อมวลน้ำหนักแห้งส่วนราก (b) ของต้นพืชน้ำที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE (n=4) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

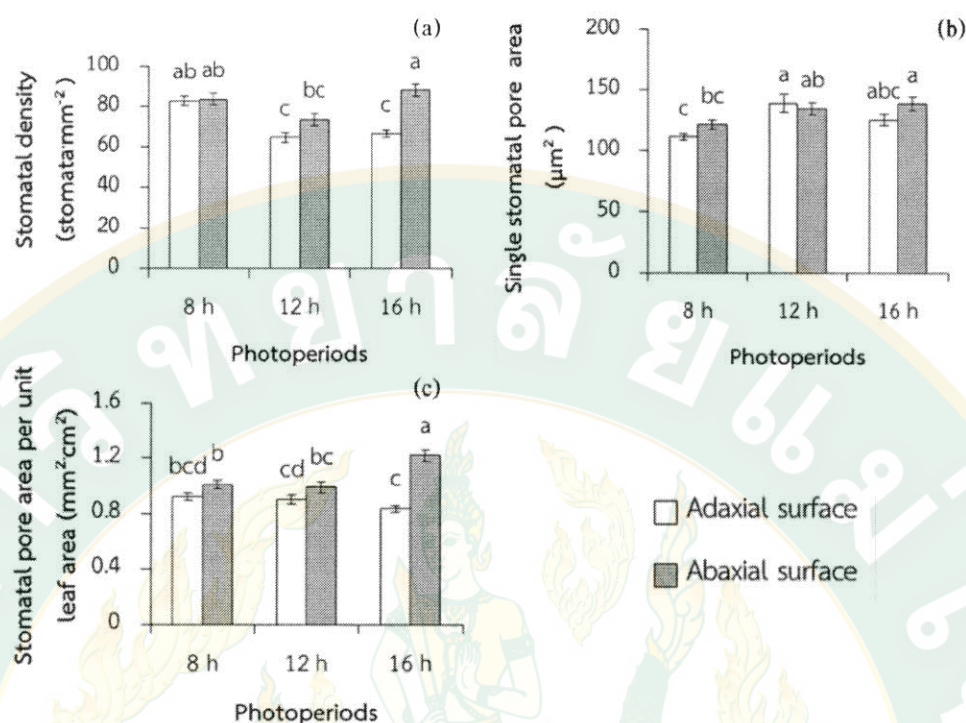
ตารางที่ 7 ความหนาใบ และความยาวของเซลล์พาลิเสด และสปันจิของใบพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE (n=50) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ในแต่ละคอลัมน์ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

Photoperiods	Leaf thickness (μm)	Palisade cells Length (μm)	Spongy cells Length (μm)
8 h	451.71 $\pm$ 2.84 c	150.96 $\pm$ 1.53 c	261.64 $\pm$ 1.00 b
12 h	466.16 $\pm$ 3.43 b	169.55 $\pm$ 1.82 b	254.28 $\pm$ 0.88 c
16 h	512.48 $\pm$ 2.06 a	197.30 $\pm$ 1.20 a	266.51 $\pm$ 0.27 a

ในส่วนของความหนาของใบพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันพบว่า การได้รับช่วงแสง 16 h ส่งผลให้มีความหนาใบมากกว่าการได้รับช่วงแสง 12 h และ 8 h อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อทำการตรวจวัดความยาวของเซลล์พาลิเสด (Palisade cell) พบว่า การได้รับช่วงแสง 16 h ส่งผลให้มีความยาวของเซลล์พาลิเสดมากที่สุด ในขณะที่การได้รับช่วงแสง 8 h จะมีความยาวของเซลล์พาลิเสด สั้นที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนเซลล์สปันจิ (Spongy cell) พบว่า การได้รับช่วงแสง 16 h ส่งผลให้มีความยาวของเซลล์สปันจิมากที่สุด และการได้รับช่วงแสง 12 h จะมีความยาวของเซลล์สปันจิสั้นที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 7 และภาพที่ 23)



ภาพที่ 23 แสดงความหนาของใบ ความยาวของเซลล์พาลิเสด และสปันจิของต้นพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด



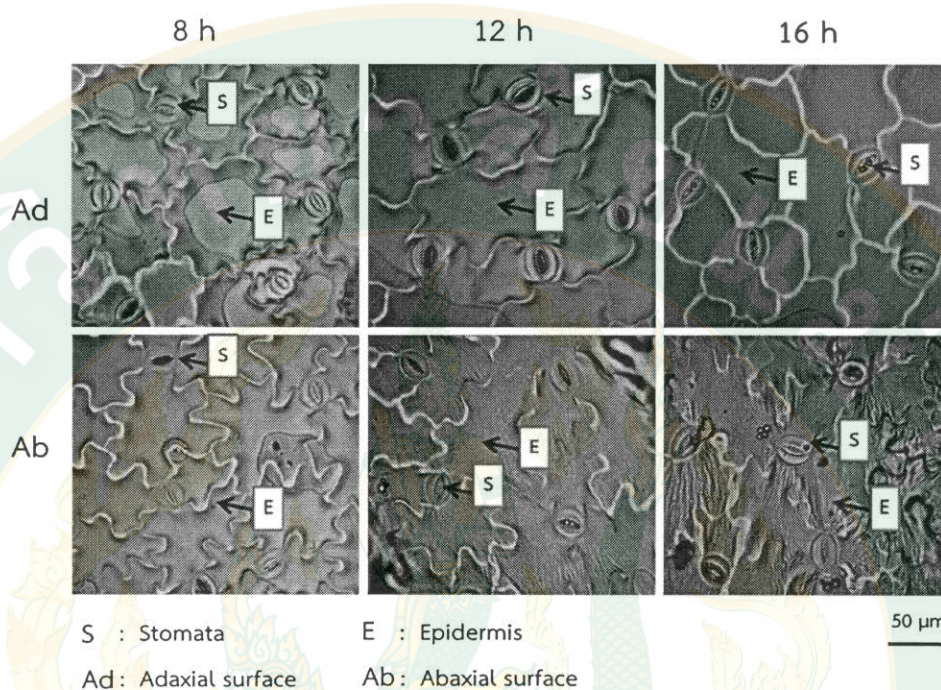
ภาพที่ 24 ความหนาแน่นของปากใบ ขนาดพื้นที่ของรูปากใบ และขนาดพื้นที่รูปากใบต่อพื้นที่ของใบพืชมะละกอบที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ($n=16$) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

จากการศึกษาความหนาแน่นของปากใบพืชมะละกอบที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันพบว่า ต้นที่ได้รับช่วงแสง 8 h มีความหนาแน่นของปากใบด้านบน และด้านล่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การได้รับช่วงแสง 12 h และ 16 h ทำให้ความหนาแน่นของปากใบด้านบนกับด้านล่างแตกต่างกัน โดยปากใบด้านล่างของการได้รับช่วงแสง 16 h มีความหนาแน่นมากที่สุด (ภาพที่ 24a และภาพที่ 25)

ในการศึกษาขนาดพื้นที่ของรูปากใบพืชมะละกอบที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกัน พบว่า การได้รับช่วงแสง 12 h ส่งผลให้ปากใบด้านบนมีขนาดพื้นที่ของรูปากใบมากที่สุด ส่วนปากใบด้านล่างเมื่อได้รับช่วงแสง 16 h ส่งผลให้มีขนาดพื้นที่รูปากใบมากที่สุด ในขณะที่ การได้รับช่วงแสง 8 h ส่งผลให้ขนาดของพื้นที่รูของปากใบทั้งด้านบน และด้านล่างมีค่าต่ำสุด (ภาพที่ 24b)

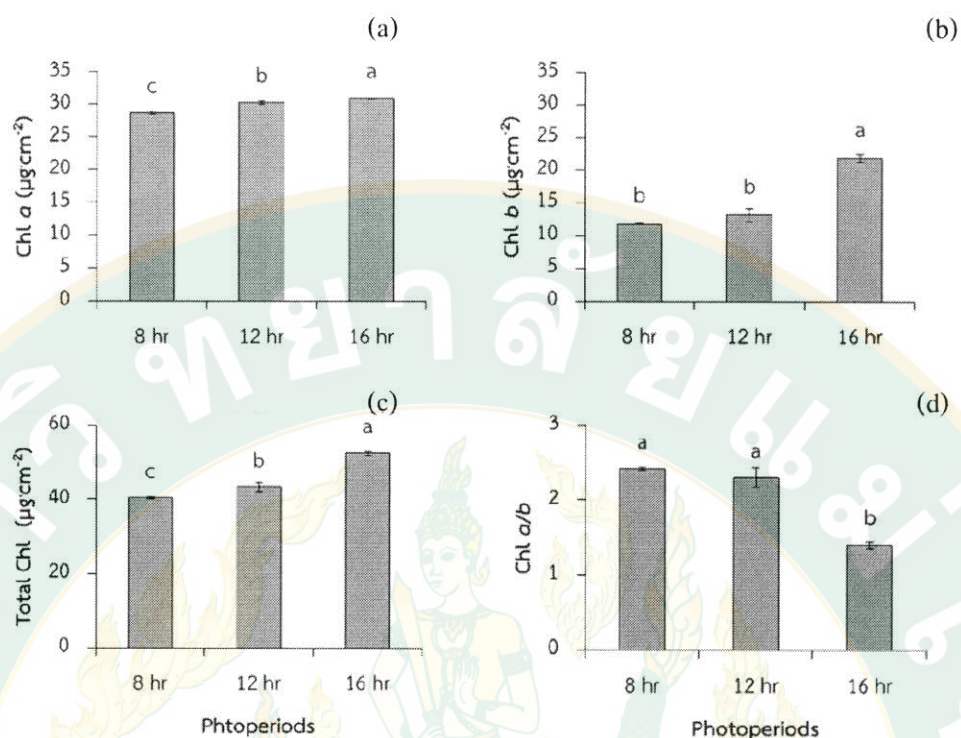
ในส่วนของการศึกษาขนาดพื้นที่รูของปากใบต่อพื้นที่ใบพืชมะละกอบที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกัน พบว่า การได้รับช่วงแสง 16 h ส่งผลให้ปากใบด้านล่างมีขนาดพื้นที่รูของปากใบต่อพื้นที่ใบมากที่สุดอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การได้รับช่วงแสงอื่น ๆ นั้น ขนาดพื้นที่รูของปากใบต่อพื้นที่ใบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 24c)



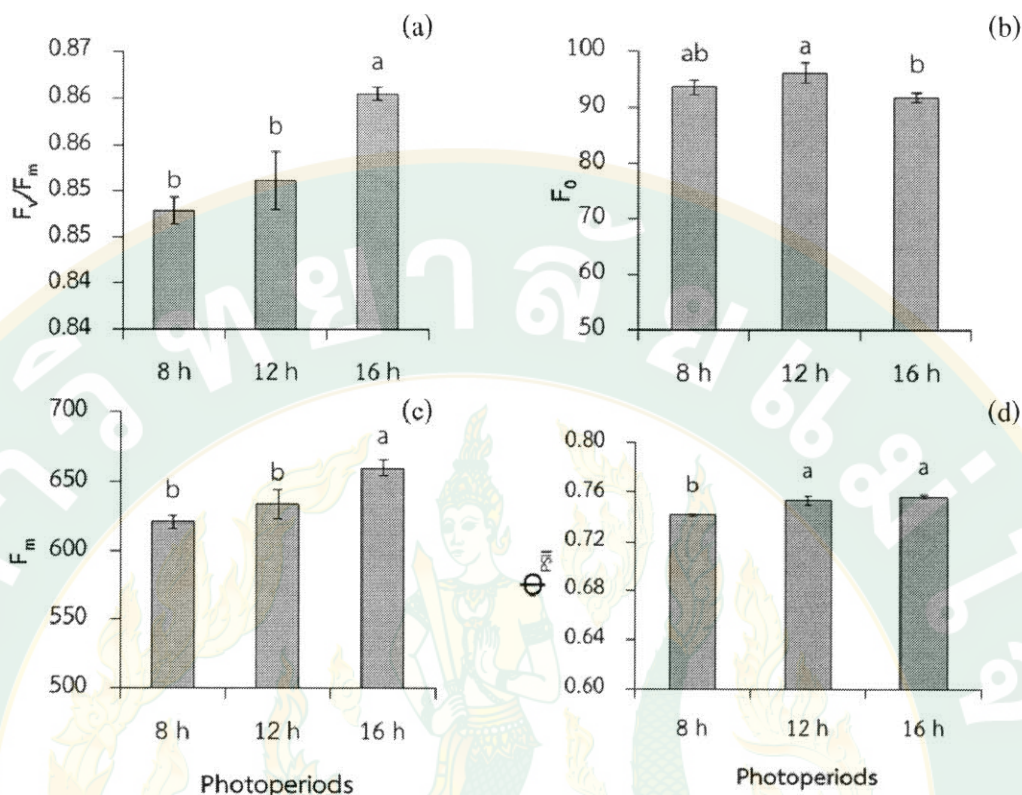
ภาพที่ 25 ลักษณะของปากใบด้านบน (Adaxial surface) และด้านล่าง (Abaxial surface) ของใบพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด

การศึกษาปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกัน พบว่า การได้รับช่วงแสง 16 h ส่งผลให้ปริมาณ คลอโรฟิลล์ *a* *b* และคลอโรฟิลล์ทั้งหมด มีค่าสูงกว่าการได้รับช่วงแสงอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การได้รับช่วงแสง 8 h ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ *a* *b* และคลอโรฟิลล์ทั้งหมดต่ำที่สุด (ภาพที่ 26a 26b และ 26c) นอกจากนี้ยังพบว่า สัดส่วนของคลอโรฟิลล์ *a* ต่อ *b* ของการได้รับช่วงแสง 16 h มีค่าต่ำสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 26d)



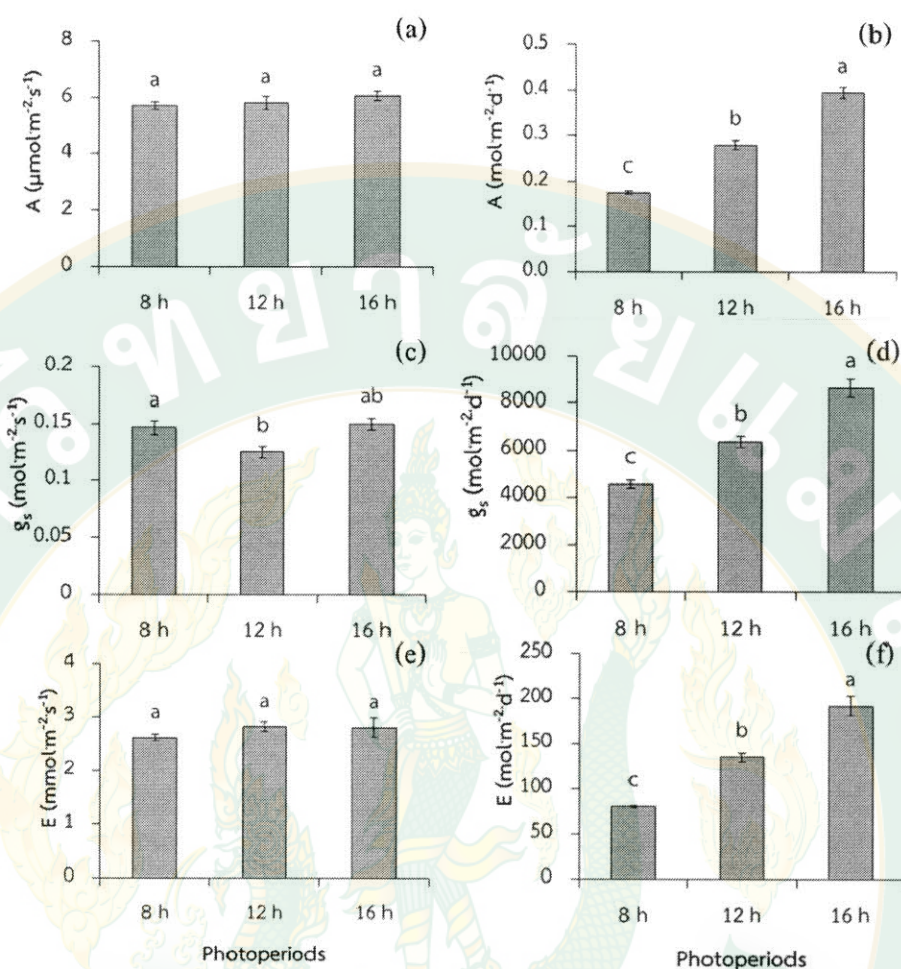
ภาพที่ 26 แสดงปริมาณคลอโรฟิลล์ *a* และ *b* คลอโรฟิลล์ทั้งหมด และสัดส่วนของคลอโรฟิลล์ *a* ต่อ *b* ของใบพืษุเนยที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ($n=3$) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

การศึกษาประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII (maximum quantum efficiency of PSII; F_v/F_m) ของใบพืษุเนยที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกัน พบว่า การได้รับแสง 16 h มีผลทำให้ค่า F_v/F_m สูงกว่าการได้รับช่วงแสงอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 27a) เมื่อทำการวิเคราะห์ค่า F_0 (Minimal fluorescence in dark-adapted leaf) และ F_m (Maximal fluorescence in dark-adapted leaf) พบว่า การได้รับช่วงแสง 16 h มีค่า F_0 ต่ำสุด ในขณะที่ F_m มีค่าสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 27b และ 27c) ส่วนค่าประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบ PSII ในสภาพสว่าง (Quantum efficiency of PSII electron transport in illuminated leaf; Φ_{PSII}) พบว่า ต้นที่ได้รับช่วงแสง 16 h และ 12 h มีค่า Φ_{PSII} ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ต้นที่ได้รับช่วงแสง 8 h มีค่า Φ_{PSII} ต่ำกว่าอีกสองตำรับอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 27d)

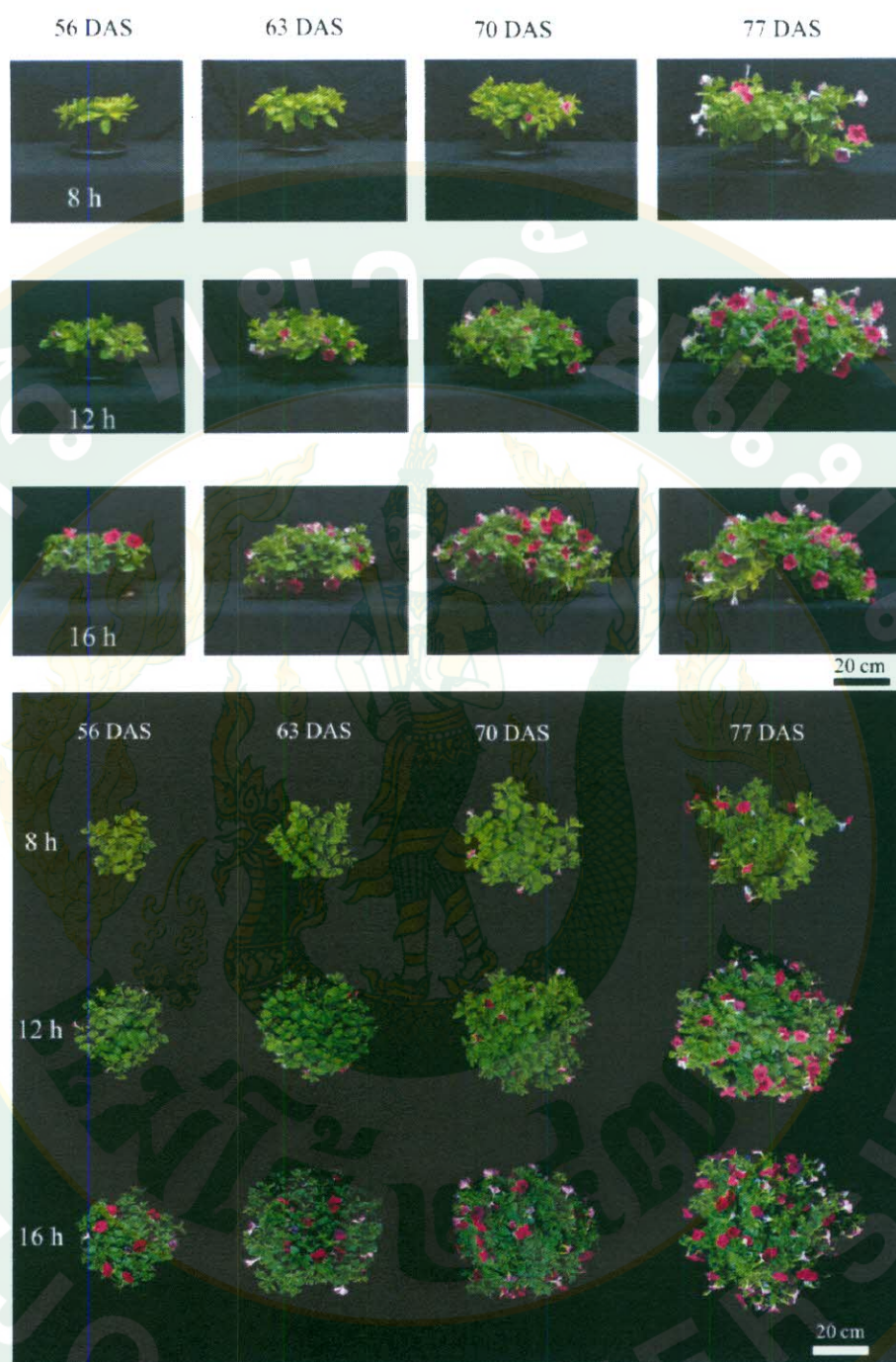


ภาพที่ 27 แสดงค่า F_v/F_m (a) F_0 (b) F_m (c) และ Φ_{PSII} (d) ของใบพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE (n=6) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

จากการศึกษาค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซของใบพิทูเนียที่อายุ 35 วัน หลังเพาะเมล็ด โดยทำการตรวจวัดเป็นค่าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ใบต่อหนึ่งหน่วยเวลา ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) เมื่อได้รับช่วงแสง 16 h 12 h และ 8 h พบว่า ทั้งค่าอัตราการสังเคราะห์แสง อัตราการนำไพลของปากใบ และอัตราการคายระเหยของน้ำ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ชัดเจน (ภาพที่ 28a 28c และ 28e) เมื่อทำการคำนวณค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซดังกล่าว เป็นค่าผลรวมต่อวัน ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) พบว่า การได้รับช่วงแสง 16 h มีค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซทั้งอัตราการสังเคราะห์แสง อัตราการนำไพลของปากใบ และอัตราการคายระเหยของน้ำ สูงกว่าการได้รับช่วงแสงอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การได้รับช่วงแสง 8 h มีค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซต่ำสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 28b 28d และ 28f)



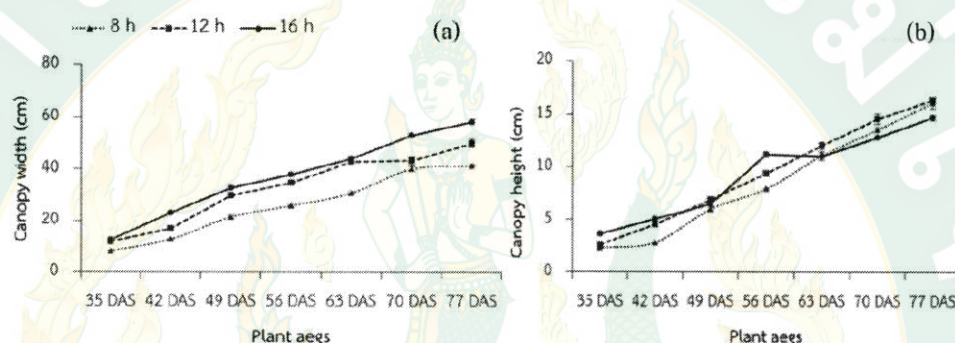
ภาพที่ 28 แสดงค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซ ได้แก่ ค่า A คือ อัตราการสังเคราะห์แสง (a และ b) ค่า g_s คือ ค่าอัตราการนำไอน้ำของปากใบ (c และ d) ค่า E คือ ค่าอัตราการคายระเหยของน้ำ (e และ f) โดย a c และ e คือ ทำการตรวจวัดเป็นค่าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ใบต่อหนึ่งหน่วยเวลา ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ส่วน b d และ f คือ ทำการตรวจวัดเป็นค่าผลรวมต่อวัน ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ของใบพืชเนียบที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 35 วันหลังเพาะเมล็ด เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ($n=6$) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)



ภาพที่ 29 แสดงลักษณะของต้นพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกัน 3 ช่วง คือ 8 12 และ 16 ชั่วโมง ต่อวัน เป็นเวลา 77 วันหลังเพาะเมล็ด ภาพด้านซ้ายคือลักษณะต้นพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสง ที่แตกต่างกันเป็นเวลา 56 วันหลังเพาะเมล็ด และด้านขวาคือ ลักษณะต้นพิทูเนีย ที่ได้รับช่วงแสง 63 70 และ 77 วันหลังเพาะเมล็ด

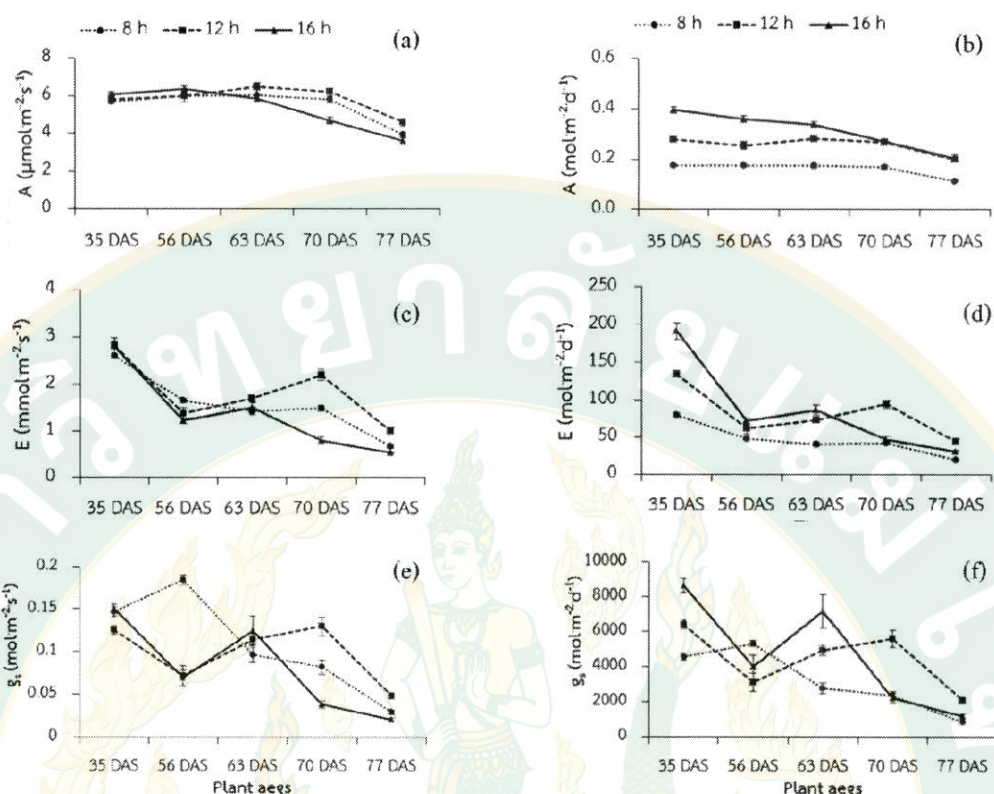
การทดลองที่ 2.2 อิทธิพลของช่วงแสงต่อการเจริญเติบโตทางลำต้น ใบ ดอก และผลผลิตเมล็ดของต้นพิทูเนีย

จากการศึกษาต้นพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันทั้ง 3 ช่วงเป็นเวลา 77 วันหลังเพาะเมล็ด พบว่า พิตูเนียที่ได้รับช่วงแสง 16 h มีความกว้างของทรงพุ่มในทุกช่วงอายุสูงกว่าการได้รับช่วงแสง 12 h และ 8 h ส่วนความสูงนั้น ต้นที่ได้รับช่วงแสง 16 h ค่อนข้างมีความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงอายุ ในขณะที่ต้นที่ได้รับช่วงแสง 12 h ในแต่ละช่วงอายุมีความสูงของทรงพุ่มมากกว่าการได้รับช่วงแสง 8 h (ภาพที่ 29 และภาพที่ 30)



ภาพที่ 30 แสดงความกว้าง (a) และความสูง (b) ของทรงพุ่มต้นพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงแตกต่างกันเป็นเวลา 77 วันหลังเพาะเมล็ด (n=6)

ในการศึกษาค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซของใบพิทูเนียตั้งแต่อายุ 35 – 77 วันหลังเพาะเมล็ด โดยทำการตรวจวัดเป็นค่าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ใบต่อหนึ่งหน่วยเวลา ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) เมื่อได้รับช่วงแสง 16 h 12 h และ 8 h พบว่า ค่าอัตราการสังเคราะห์แสง ค่าอัตราการนำไหลของปากใบ และค่าอัตราการคายระเหยของน้ำของต้นพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสงทั้ง 3 ช่วงนั้น มีค่าผันแปรกับช่วงอายุพืชที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราการสังเคราะห์แสงจะลดลงเมื่ออายุพืชเพิ่มขึ้น ซึ่งการได้รับช่วงแสง 16 h เริ่มมีค่าลดลงที่ช่วงอายุ 56 วันหลังเพาะเมล็ดเป็นต้นไป ในขณะที่การได้รับช่วงแสง 12 h เริ่มมีค่าลดลงที่อายุ 63 วันหลังเพาะเมล็ด และการได้รับช่วงแสง 8 h เริ่มมีค่าลดลงที่อายุ 70 วันหลังเพาะเมล็ด ส่วนค่าอัตราการนำไหลของปากใบ และอัตราการคายระเหยของน้ำนั้นมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วัยอายุ 35 – 77 วันหลังเพาะเมล็ด โดยการได้รับช่วงแสง 16 h มีค่าลดลงต่ำกว่าการได้รับช่วงแสงอื่น ๆ ตามช่วงเวลาเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 31a 31c และ 31e)



ภาพที่ 31 แสดงค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซ a c และ e คือ ตรวจวัดเป็นค่าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ใบต่อหนึ่งหน่วยเวลา ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ส่วน b d และ f คือ ตรวจวัดเป็นค่าผลรวมต่อวัน ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ของใบพืชเนื้อที่ตั้งแต่อายุ 35 – 77 วัน หลังเพาะเมล็ด ($n=16$)

เมื่อทำการคำนวณค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซดังกล่าวเป็นค่าผลรวมต่อวัน ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) พบว่า การได้รับช่วงแสง 16 h ส่งผลให้ค่าผลรวมของคาร์บอนที่พืชได้รับต่อหนึ่งวันลดลงอย่างต่อเนื่องตามช่วงเวลาการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การได้รับช่วงแสง 12 h และ 8 h ค่าผลรวมของคาร์บอนที่พืชได้รับต่อหนึ่งวันค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงอายุของการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งเริ่มลดต่ำลงที่อายุ 63 วันหลังเพาะเมล็ด อย่างไรก็ตามการคำนวณของคาร์บอนที่พืชได้รับต่อหนึ่งวันของการได้รับช่วงแสง 8 h ต่ำกว่าการได้รับช่วงแสงอื่น ๆ ตลอดช่วงอายุของการเจริญเติบโต ส่วนค่าผลรวมของการนำไพลของปากใบ และการคายระเหยของน้ำของการได้รับช่วงแสงทั้ง 3 ช่วง พบว่า มีค่าลดต่ำลงไปในทิศทางเดียวกันตลอดช่วงอายุของการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้น โดยการได้รับช่วงแสง 8 h มีค่าค่อนข้างต่ำกว่าการได้รับช่วงแสงอื่น ๆ (ภาพที่ 31b 31d และ 31f)

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวของช่วงแสง (A) และอายุพืช (B) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกสองทางของปฏิสัมพันธ์ระหว่างช่วงแสงกับอายุพืช (A x B) ที่มีผลต่อความกว้าง ความสูง และค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซทั้งที่ทำการตรวจวัดเป็นค่าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ใบต่อหนึ่งหน่วยเวลา ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) และค่าผลรวมต่อวัน ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)

Dependent variables	Independent variables		
	Photoperiods	Plant ages	A x B
	(A)	(B)	
Canopy width (n=6)	>0.01**	>0.01**	>0.01**
Canopy height (n=6)	>0.01**	>0.01**	>0.01**
A ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) (n=16)	>0.01**	>0.01**	>0.01**
E ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) (n=16)	>0.01**	>0.01**	>0.01**
g_s ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) (n=16)	>0.01**	>0.01**	>0.01**
A ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) (n=16)	>0.01**	>0.01**	>0.01**
E ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) (n=16)	>0.01**	>0.01**	>0.01**
g_s ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) (n=16)	>0.01**	>0.01**	>0.01**

หมายเหตุ ตัวเลขที่ระบุในตารางแสดงค่า P (p-value) โดย $P < 0.01 = (**)$ มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง $P < 0.05 = (*)$ มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ $P \geq 0.05 = (\text{NS})$ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

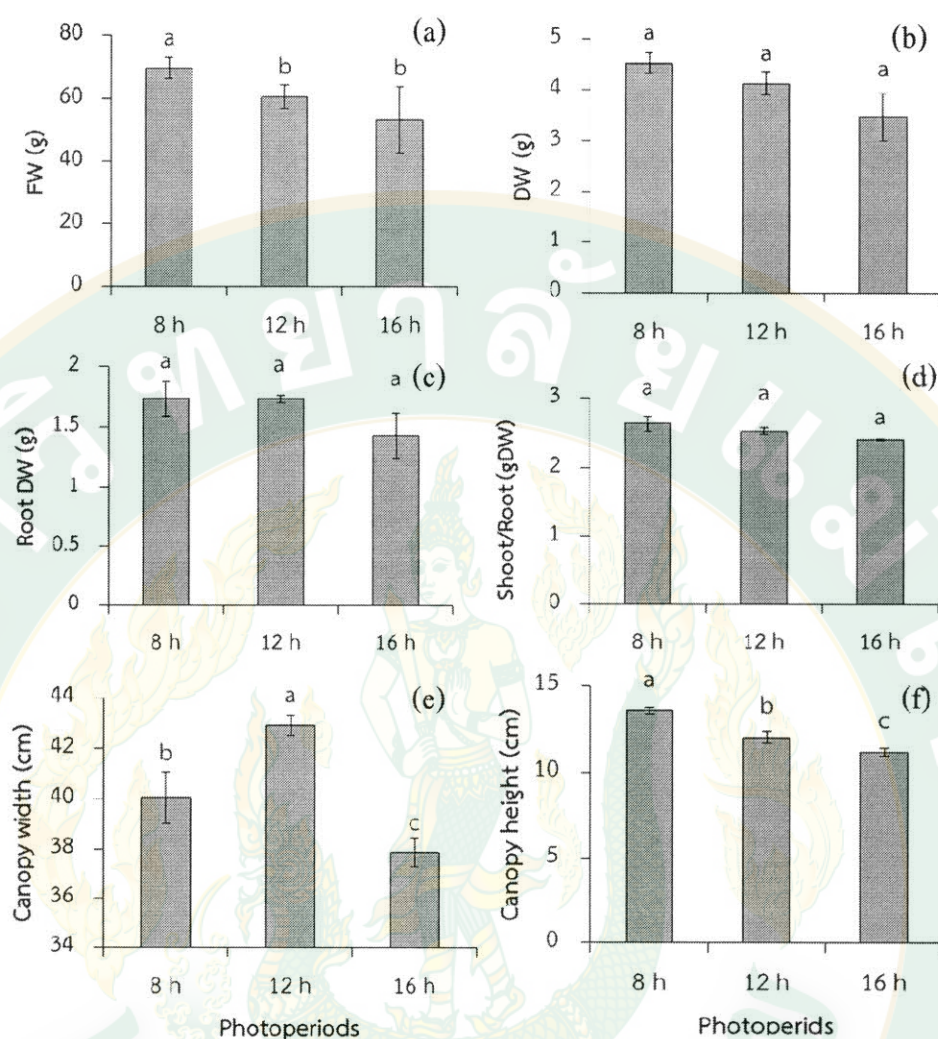
จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของช่วงแสง อายุพืช และปฏิสัมพันธ์ระหว่างช่วงแสงกับอายุพืชต่อค่า ความกว้าง ความสูง และค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซทั้งการตรวจวัดเป็นค่าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ใบต่อหนึ่งหน่วยเวลา ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) และค่าผลรวมต่อวัน ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) พบว่า ช่วงแสง และอายุพืช ส่งผลต่อค่าของพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ตรวจวัดอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง นอกจากนี้ยังพบว่า ช่วงแสงส่งผลต่อค่าของพารามิเตอร์ทั้งหมดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอย่างยิ่งของแต่ละช่วงอายุพืช (ตารางที่ 8)

จากการศึกษาการเจริญเติบโตในช่วงระยะดอกแรกบาน ของต้นพื้ญเญที่ได้รับช่วงแสงทั้ง 3 ช่วง พบว่า การได้รับช่วงแสง 8 h ส่งผลให้มวลน้ำหนักสดของส่วนลำต้นมีค่าสูงกว่าการได้รับช่วงแสง

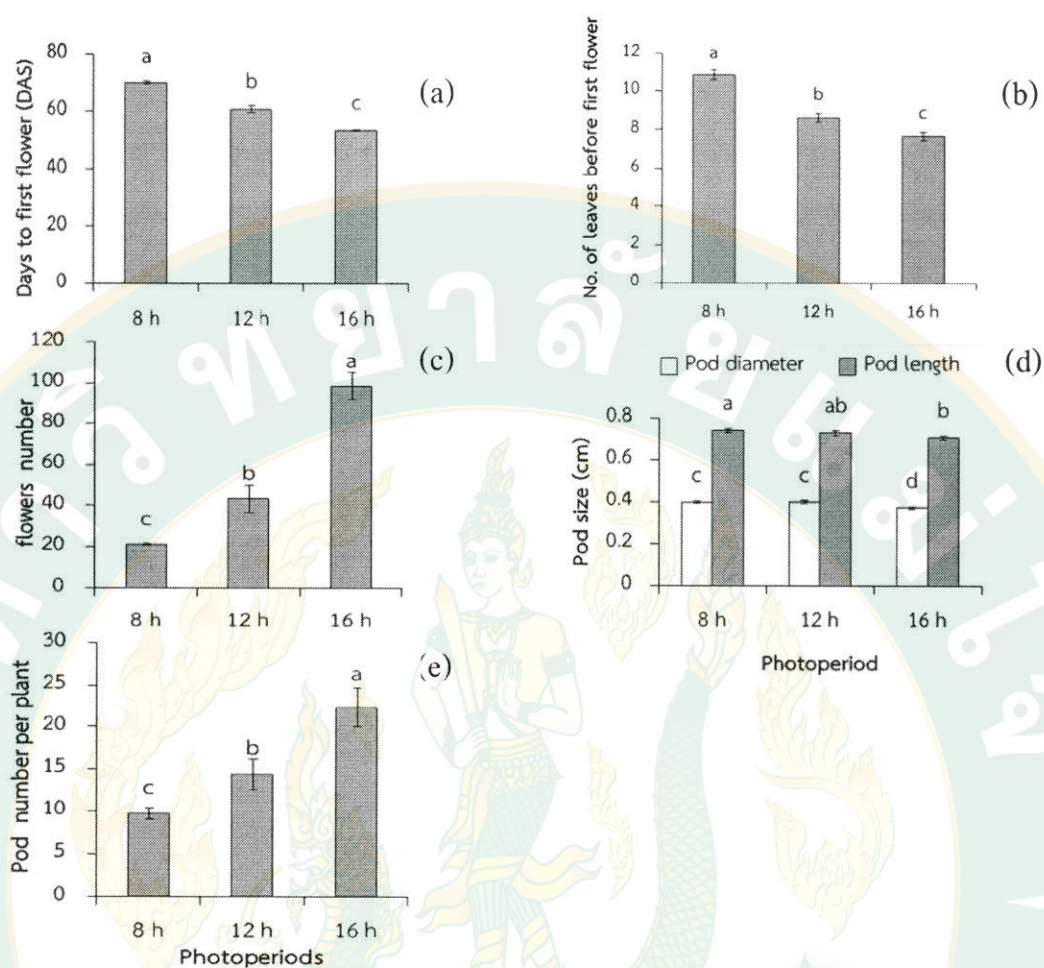
อื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ มวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น มวลน้ำหนักแห้งส่วนราก และ สัดส่วนมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้นต่อมวลน้ำหนักแห้งส่วนรากของต้นพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสง ทั้ง 3 ช่วง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ลักษณะของทรงพุ่มในช่วงระยะดอก แรกบาน พบว่าต้นที่ได้รับช่วงแสง 12 h มีความกว้างของทรงพุ่มสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การได้รับช่วงแสง 8 h มีความสูงของทรงพุ่มสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 32)

ในการศึกษาจำนวนวันก่อนดอกแรกบาน หลังจากการเพาะเมล็ด พบว่า การได้รับช่วงแสง 8 h ส่งผลให้มีจำนวนวันก่อนดอกแรกบาน และจำนวนใบของกิ่งก่อนการพบการออกดอกแรก มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การได้รับช่วงแสง 16 h มีจำนวนวันก่อนดอกแรกบาน สั้นที่สุด (ภาพที่ 33a 33b 33d และ ภาพที่ 34) และมีขนาดฝักเล็กที่สุดด้วย ส่วนจำนวนดอก และ จำนวนฝัก พบว่า การได้รับช่วงแสง 16 h มีจำนวนดอก และฝักมากกว่าการได้รับช่วงแสงอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 33c และ 33e)

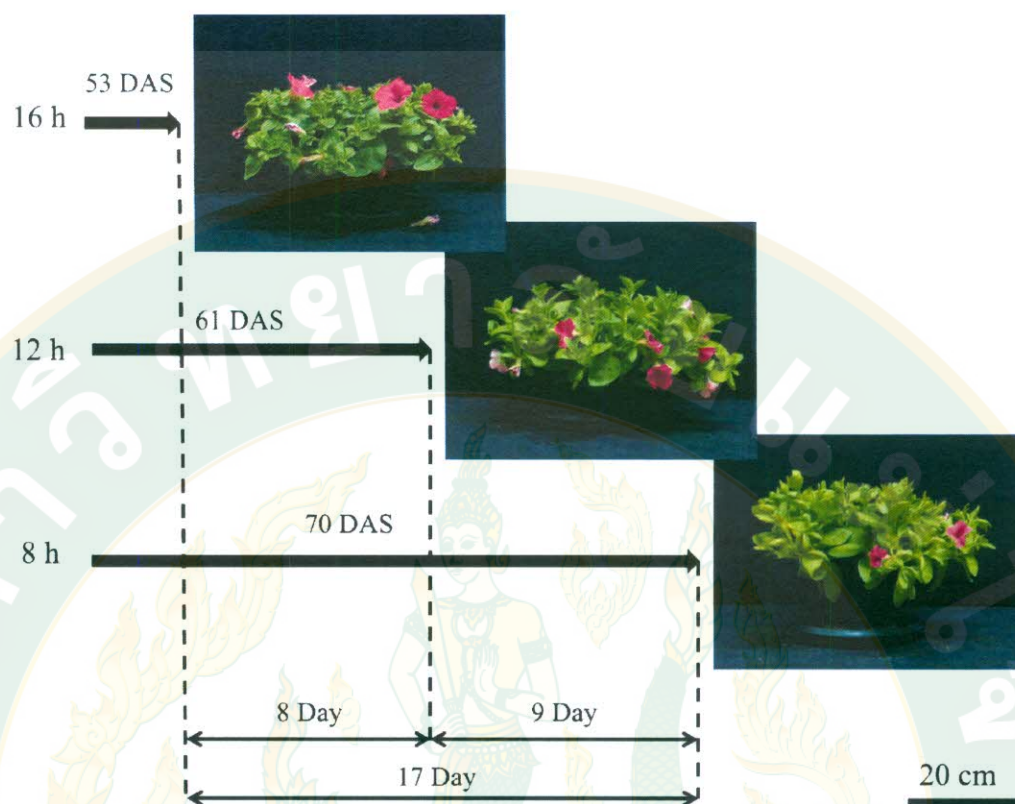
ในการศึกษาจำนวนเมล็ดต่อฝัก พบว่า การได้รับช่วงแสงทั้ง 3 ช่วง ไม่มีผลทำให้จำนวนเมล็ด ต่อฝักแตกต่างกัน ในขณะที่ต้นที่ได้รับช่วงแสง 16 h มีจำนวนเมล็ดต่อต้นมากที่สุด (ภาพที่ 35a และ 35b) ส่วนมวลน้ำหนัสดของเมล็ดพบว่า ต้นที่ได้รับช่วงแสงทั้ง 3 ช่วง มีมวลน้ำหนัสดของเมล็ด ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่มวลน้ำหนักแห้งของเมล็ดจากต้นที่ได้รับช่วงแสง 8 h มีค่ามากที่สุด (ภาพที่ 35c และ 35d)



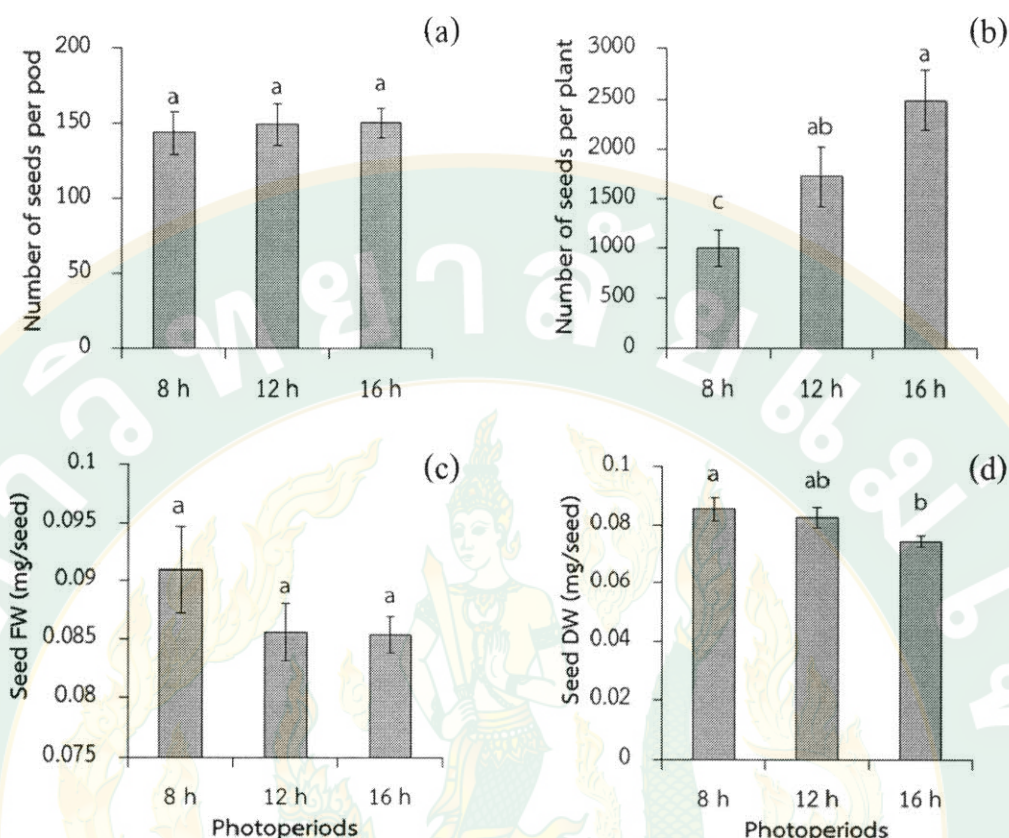
ภาพที่ 32 แสดงมวลน้ำหนักสดส่วนลำต้น (n=3) (a) มวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น (n=3) (b) มวลน้ำหนักแห้งส่วนราก (n=3) (c) สัดส่วนมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้นต่อมวลน้ำหนักแห้งส่วนราก (n=3) (d) ความกว้างทรงพุ่ม (n=6) (e) และความสูงทรงพุ่ม (n=6) (f) ของต้นพืชมะเขือในระยะเวลาที่พบดอกแรกบาน ของการได้รับช่วงแสงที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)



ภาพที่ 33 แสดงจำนวนวันก่อนดอกแรกบาน โดยนับวันแรกหลังจากเพาะเมล็ด (n=3) (a) จำนวนใบของกิ่งก่อนการพบการออกดอกแรก (n=18) (b) จำนวนดอก (n=3) (c) จำนวนฝักต่อต้น (n=3) (d) และขนาดฝักในช่วงลำดับฝักที่ 1-10 (n=34) (e) ของต้นพื้ญญที่ได้รับช่วงแสงที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

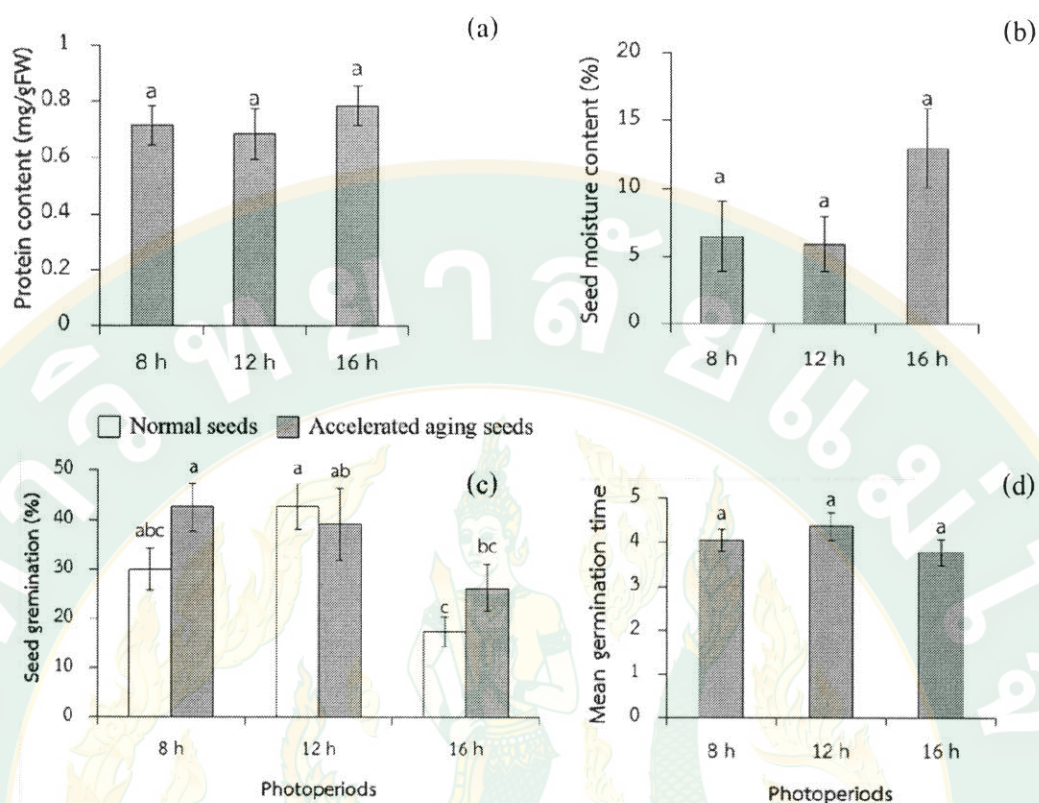


ภาพที่ 34 แสดงลักษณะต้นพืชนี และจำนวนวันที่พบดอกแรกบาน โดยการได้รับช่วงแสง 16 h พบดอกแรกบาน ที่อายุเฉลี่ย 53 วันหลังจากเพาะเมล็ด การได้รับช่วงแสง 12 h พบดอกแรกบาน ที่อายุเฉลี่ย 61 วันหลังจากเพาะเมล็ด และการได้รับช่วงแสง 8 h พบดอกแรกบาน ที่อายุเฉลี่ย 70 วันหลังจากเพาะเมล็ด โดยจำนวนวันก่อนดอกแรกบาน ของการได้รับช่วงแสง 16 h ต่างจากการได้รับช่วงแสง 12 h จำนวน 8 วัน และต่างจากการได้รับช่วงแสง 8 h จำนวน 17 วัน



ภาพที่ 35 แสดงจำนวนเมล็ดต่อฝัก (n=12) (a) จำนวนเมล็ดต่อต้น (n=3) (b) มวลน้ำหนักสดของเมล็ด (n=9) (c) และมวลน้ำหนักแห้งของเมล็ด (n=9) (d) ของต้นพืชที่ได้รับช่วงแสงที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

การศึกษาปริมาณโปรตีนในเมล็ดพบว่า การได้รับช่วงแสงแตกต่างกันทั้ง 3 ช่วง ไม่มีผลทำให้ปริมาณโปรตีนในเมล็ดแตกต่างกัน (ภาพที่ 36a) เช่นเดียวกับความชื้นของเมล็ด ซึ่งไม่พบความแตกต่าง (ภาพที่ 36b) ส่วนเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ด พบว่า เมล็ดพืชปกติ (Normal seed) และเมล็ดพืชที่ผ่านการเร่งอายุ (Accelerated aging of seed) ของการได้รับช่วงแสง 16 h มีเปอร์เซ็นต์การงอกค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม เมล็ดที่ได้จากต้นพืชที่ได้รับช่วงแสงทั้ง 3 ช่วง มีเปอร์เซ็นต์การงอกไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 36c) นอกจากนี้ค่าเฉลี่ยจำนวนวันที่ใช้ในการงอก (Mean Germination Time หรือ MGT) พบว่า ไม่มีความแตกต่างกัน (ภาพที่ 36d)



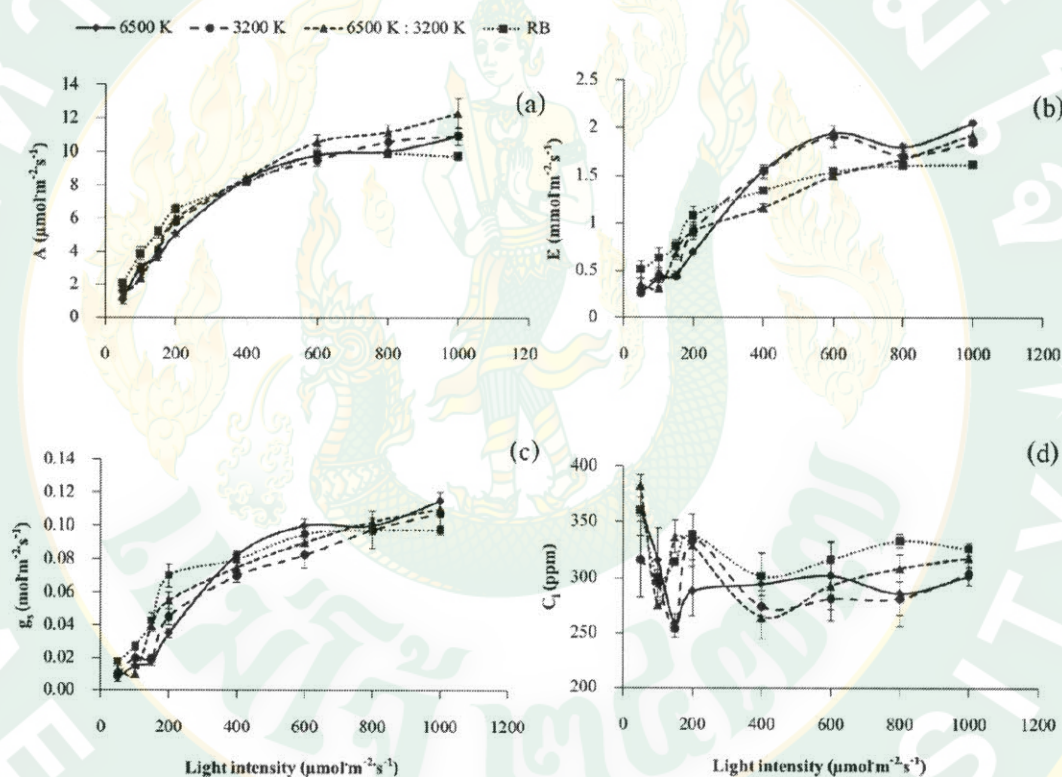
ภาพที่ 36 แสดงปริมาณโปรตีนในเมล็ด (n=12) (a) ความชื้นเมล็ด (n=9) (b) เปอร์เซ็นต์ความงอก (n=7) (c) และค่าเฉลี่ยจำนวนวันที่ใช้ในการงอก (n=7) (d) ของต้นพื้หนูที่ได้รับช่วงแสงที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

หมายเหตุ เมล็ดที่ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบนี้ เป็นเมล็ดที่นำมาทดสอบโดยไม่ผ่านกระบวนการทำลายการพักตัวของเมล็ด

การทดลองที่ 3 อิทธิพลของคุณภาพ และความเข้มแสงจากหลอด LED
ต่อการเจริญเติบโตของต้นพืทุเนีย

การทดลองที่ 3.1 อิทธิพลของความเข้ม และคุณภาพแสง (Light response function) ต่อค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซ

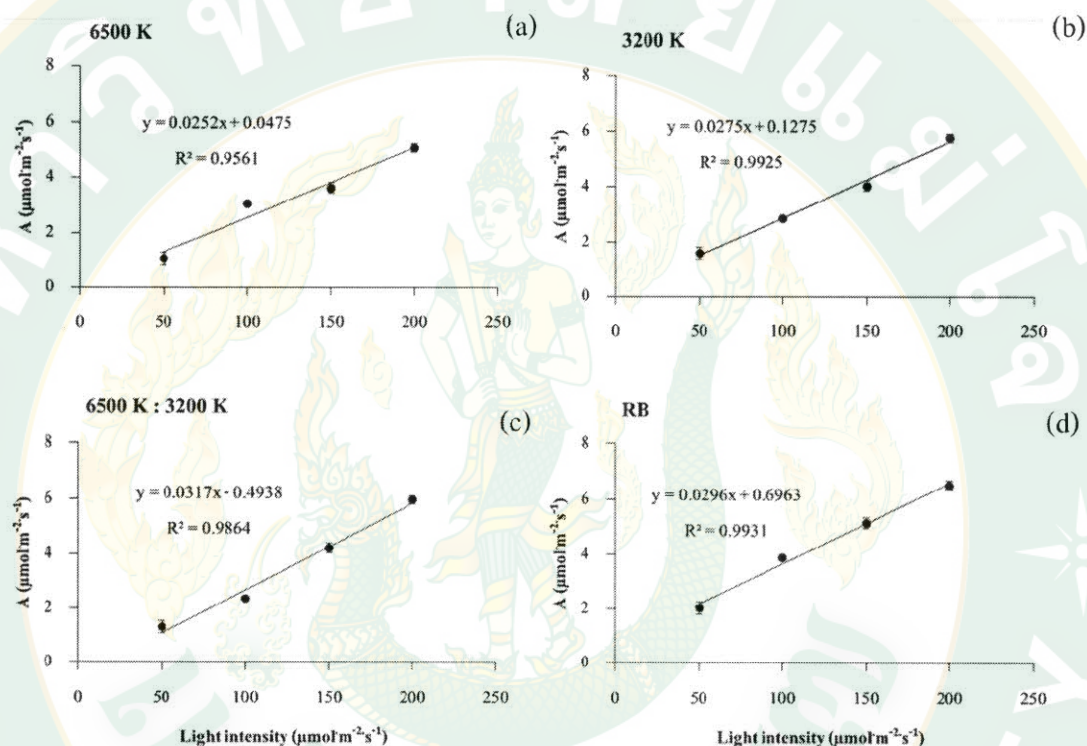
เส้นตอบสนองต่อแสงของคุณภาพแสงทั้ง 4 ดำรับ พบว่า เส้นกราฟของค่าอัตราการสังเคราะห์แสง ค่าอัตราการคายระเหยของน้ำ และค่าอัตราการนำไหลของปากใบ เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 37a 37b และ 37c)



ภาพที่ 37 แสดงเส้นตอบสนองต่อแสงทั้ง 4 ดำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซ ได้แก่ ค่าอัตราการสังเคราะห์แสง (a) ค่าอัตราการคายระเหยของน้ำ (b) ค่าอัตราการนำไหลของปากใบ (c) และปริมาณ CO_2 ในช่องว่างระหว่างเซลล์ของใบพืทุเนีย (d) ($n=4$)

ในขณะที่ปริมาณ CO_2 ในช่องว่างระหว่างเซลล์ของใบพืทุเนียลดต่ำลงในช่วงระดับความเข้มแสง $50 - 150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ และมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงระดับความเข้มแสงตั้งแต่ $200 - 1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (ภาพที่ 37d)

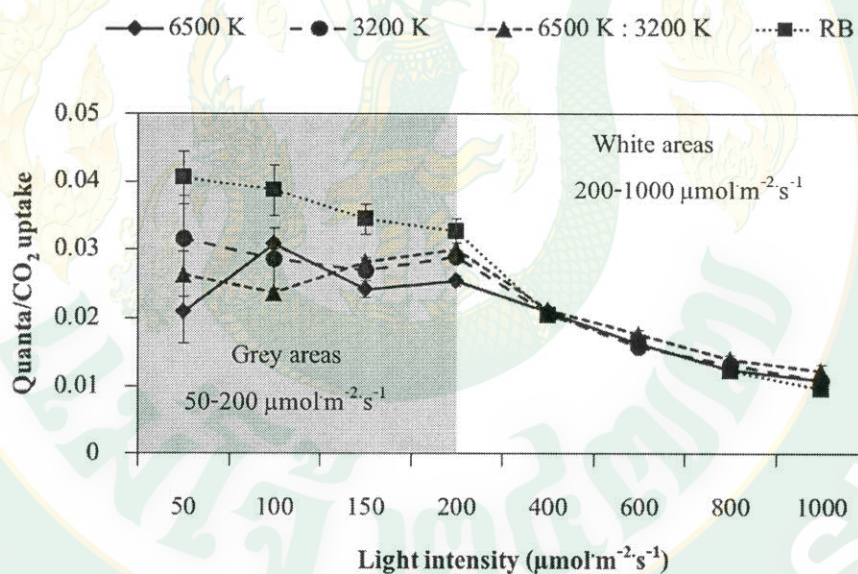
ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับค่าอัตราการสังเคราะห์แสงภายใต้คุณภาพแสงทั้ง 4 ดำรับ (ภาพที่ 38a 38b 38c และ 38d) พบว่า ดำรับ 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB มีระดับความสัมพันธ์ที่ไม่แตกต่างกัน โดยดำรับ 6500 K : 3200 K และ RB มีค่าความสัมพันธ์ที่สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ ค่าความชันของเส้นแนวโน้มที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการใช้แสง พบว่า ดำรับ 6500 K มีค่าต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 9)



ภาพที่ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง ($50\text{-}200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) กับค่าอัตราการสังเคราะห์แสงภายใต้คุณภาพแสงทั้ง 4 ดำรับ ($n=4$)

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวของค่าความชันของเส้นแนวโน้ม และ R^2 ของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง ($50\text{-}200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) กับค่าอัตราการสังเคราะห์แสงภายใต้คุณภาพแสงทั้ง 4 ดำรับ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ($n=4$) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

Treatment	Initial slope	R^2
6500 K	$0.0253 \pm 0.0011\ b$	$0.95 \pm 0.0167\ b$
3200 K	$0.0275 \pm 0.0013\ ab$	$0.98 \pm 0.0029\ ab$
6500 K : 3200 K	$0.0317 \pm 0.0015\ a$	$0.98 \pm 0.0035\ a$
RB	$0.0296 \pm 0.0014\ a$	$0.99 \pm 0.0062\ a$



ภาพที่ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงในการตรึง CO_2 (Quanta/ CO_2 uptake) ของใบพืชนี้อยภายใต้คุณภาพแสงทั้ง 4 ดำรับ ($n=4$)

ตารางที่ 10 การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของคุณภาพแสง และความเข้มแสง (พื้นที่สีเทาในภาพที่ 23 ; $50-200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงในการตรึง CO_2 (Quanta/ CO_2 uptake) (n=4)

Dependent Variable	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	b	SE.	Beta		
Light quality	0.003	0.001	0.493	4.440	<0.001*
Light Intensity	<0.001	0.001	-0.062	-0.559	NS
$R^2 = 0.222$; $SE = 0.00639$; $Sig = <0.001^*$					

หมายเหตุ (*) คือ มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05
NS คือ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 11 การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของคุณภาพแสง และความเข้มแสง (พื้นที่สีขาวในภาพที่ 23 ; $200-1000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงในการตรึง CO_2 (Quanta/ CO_2 uptake) (n=4)

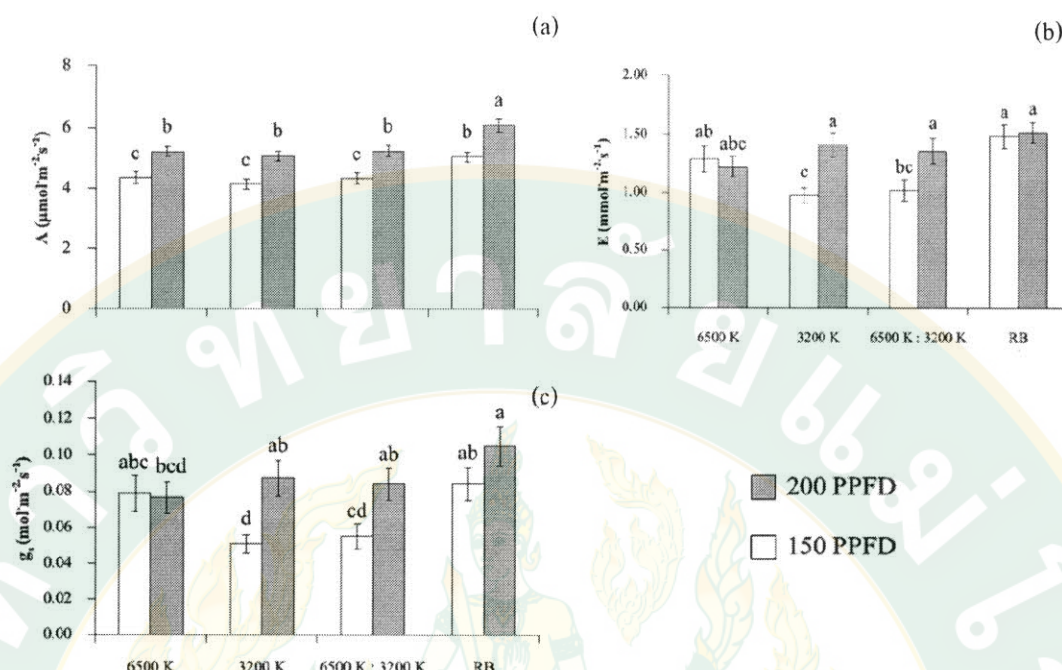
Dependent Variable	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	b	SE.	Beta		
Light quality	<0.001	<0.001	0.073	1.819	NS
Light Intensity	-0.004	<0.001	-0.932	-23.070	<0.001*
$R^2 = 0.871$; $SE = 0.00242$; $Sig = <0.001^*$					

หมายเหตุ (*) คือ มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05
NS คือ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงในการตรึง CO_2 ภายใต้คุณภาพแสงทั้ง 4 ตำรับ พบว่า ความเข้มแสงที่แตกต่างกันในระดับ $50\text{-}200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ไม่ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงในการตรึง CO_2 เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่คุณภาพแสงทั้ง 4 ตำรับเมื่อได้รับความเข้มแสงเหมือนกันของช่วงระดับความเข้มแสงดังกล่าว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงในการตรึง CO_2 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 39 และตารางที่ 10) ส่วนการได้รับความเข้มแสงที่ระดับ $200\text{-}1000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ พบว่า ความเข้มแสงที่สูงกว่า $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ เป็นต้นไปส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงในการตรึง CO_2 ลดต่ำลงต่อเนื่อง และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้คุณภาพแสงในแต่ละตำรับนั้น มีทิศทางความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน ในขณะที่ ประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงในการตรึง CO_2 ระหว่างคุณภาพแสงทั้ง 4 ตำรับ ไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 39 และตารางที่ 11)

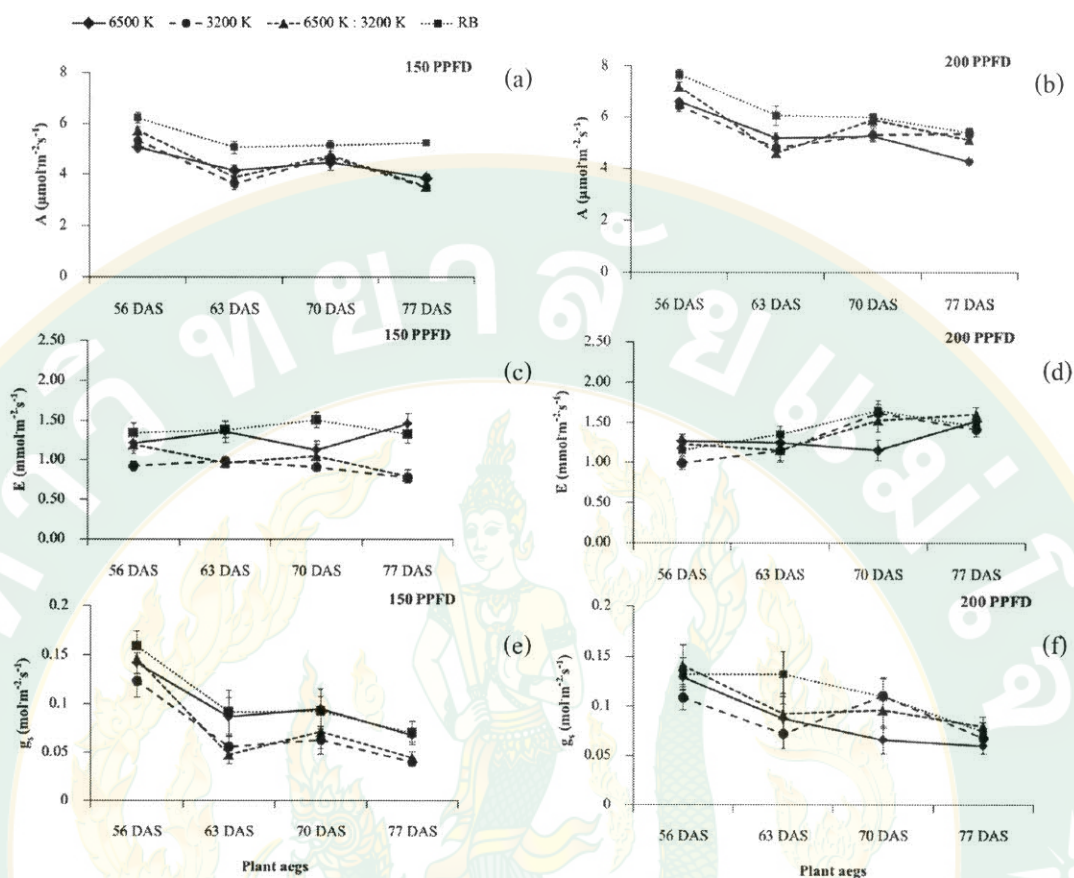
การทดลองที่ 3.2 อิทธิพลของคุณภาพแสง และความเข้มแสงต่อการเจริญเติบโตทั้งทางด้านสรีรวิทยา และสัณฐานวิทยา

การศึกษาค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซภายใต้คุณภาพแสง และความเข้มแสงที่แตกต่างกันพบว่า คุณภาพแสงทั้ง 4 ตำรับ เมื่อได้รับความเข้มแสงที่ระดับ $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ส่งผลให้ค่าอัตราการสังเคราะห์มีค่าสูงกว่าการได้รับความเข้มแสง $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ โดยตำรับ RB ที่ระดับความเข้มแสง $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ มีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าอัตราการสังเคราะห์แสงของตำรับ 6500 K 3200 K และ 6500 K : 3200 K ที่ระดับความเข้มแสง $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กับตำรับ RB ที่ระดับความเข้มแสง $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (ภาพที่ 40a) ส่วนค่าอัตราการคายระเหยของน้ำ และค่าอัตราการนำไหลของปากใบ พบว่า ตำรับ 3200 K และ 6500 K : 3200 K มีค่าอัตราการคายระเหยของน้ำ และค่าอัตราการนำไหลของปากใบที่สอดคล้องกับค่าอัตราการสังเคราะห์แสง โดยทั้งสองตำรับนี้เมื่อได้รับความเข้มแสงที่ระดับ $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ มีค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซที่ไม่แตกต่างกัน และมีค่าสูงกว่าการได้รับความเข้มแสงที่ระดับ $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ตำรับ 6500 K และ RB พบว่าการได้รับความเข้มแสงที่ระดับ $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ มีค่าอัตราการคายระเหยของน้ำ และค่าอัตราการนำไหลของปากใบ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการได้รับความเข้มแสงที่ระดับ $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ และไม่สอดคล้องกับค่าอัตราการสังเคราะห์แสง (ภาพที่ 40a และ 40b)

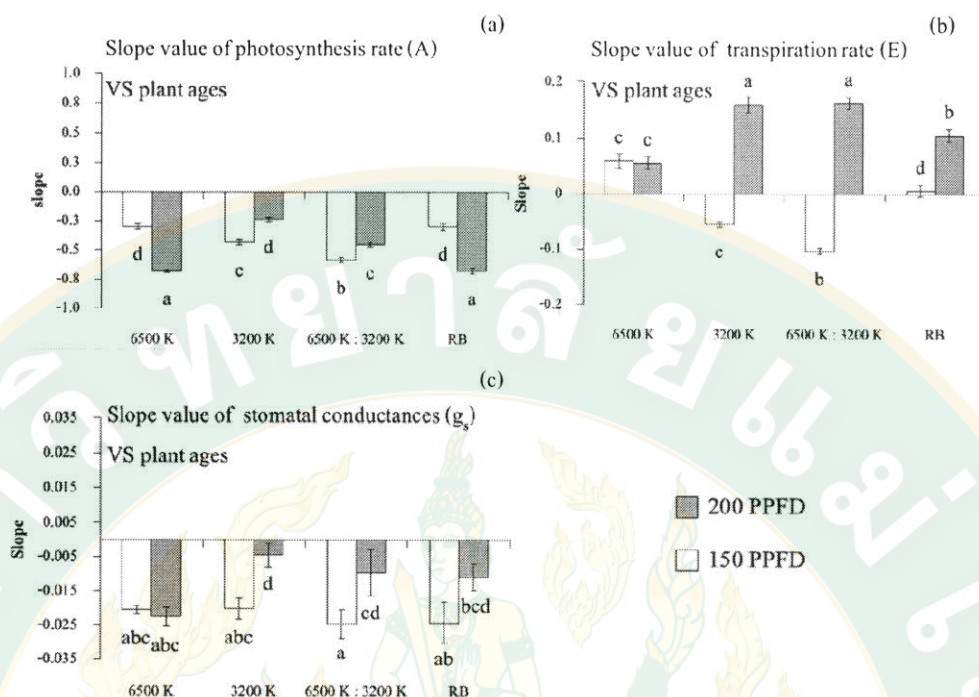


ภาพที่ 40 แสดงค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซ ได้แก่ ค่าอัตราการสังเคราะห์แสง (a) ค่าอัตราการคายระเหยของน้ำ (b) และค่าอัตราการนำไหลของปากใบ (c) ของใบพิทูเนียในช่วงอายุ 63-70 วันหลังเพาะเมล็ด โดยได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ตำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB และได้รับความเข้มแสง 2 ระดับ คือ 200 และ $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ($n=28$) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

การศึกษาความสัมพันธ์ของค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซกับอายุพืชภายใต้คุณภาพแสง และความเข้มแสงที่แตกต่างกัน พบว่า ตำรับ 3200 K และ 6500 K : 3200 K มีลักษณะความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน โดยอายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไหลของปากใบลดต่ำลง ซึ่งการได้รับความเข้มแสง $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มหรืออัตราการลดลงมากกว่าการได้รับความเข้มแสง $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนค่าการคายระเหยน้ำ พบว่า การได้รับความเข้มแสง $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ของทุกตำรับ ส่งผลให้มีการคายระเหยน้ำเพิ่มขึ้นตามอายุพืชที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ ตำรับ 6500 K และ RB มีลักษณะความสัมพันธ์ทั้งค่าอัตราการสังเคราะห์แสง และค่าการนำไหลของปากใบกับอายุพืชของความเข้มแสงทั้ง 2 ระดับไปในทิศทางเดียวกัน (ภาพที่ 41 และภาพที่ 42)

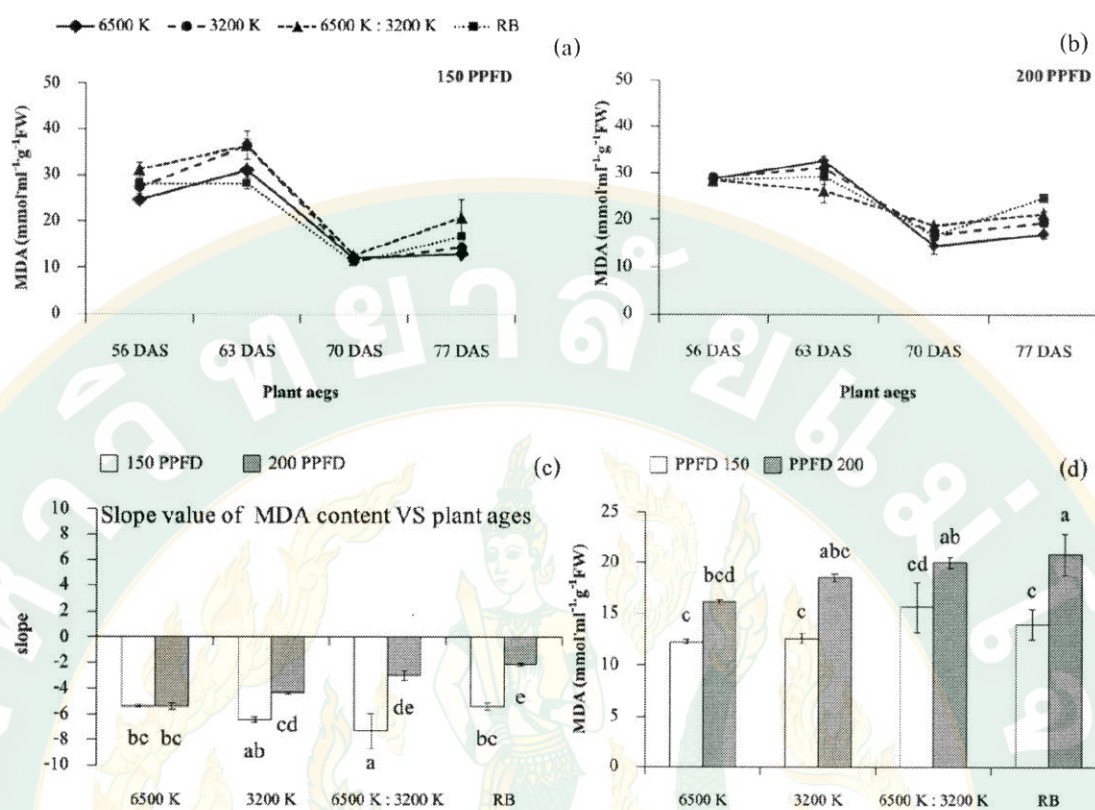


ภาพที่ 41 แสดงค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซ ได้แก่ ค่าอัตราการสังเคราะห์แสง (a และ b) ค่าอัตราการคายระเหยของน้ำ (c และ d) และค่าอัตราการนำไพลของปากใบ (e และ f) ของใบพืชมุขตั้งแต่อายุ 56-77 วันหลังเพาะเมล็ด โดยได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ดำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB และได้รับความเข้มแสง 2 ระดับ คือ $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (b d และ f) และ $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (a c และ e) ($n=12$)



ภาพที่ 42 แสดงค่าความชันของเส้นแนวโน้ม และทิศทางการสัมพันธ์ (ค่าความชันของเส้นแนวโน้มที่ติดลบ หมายถึง อายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซลดลง ค่าความชันของเส้นแนวโน้มที่เป็นบวก หมายถึง อายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซเพิ่มขึ้น) ระหว่างค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซกับอายุพืช เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE (n=12) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

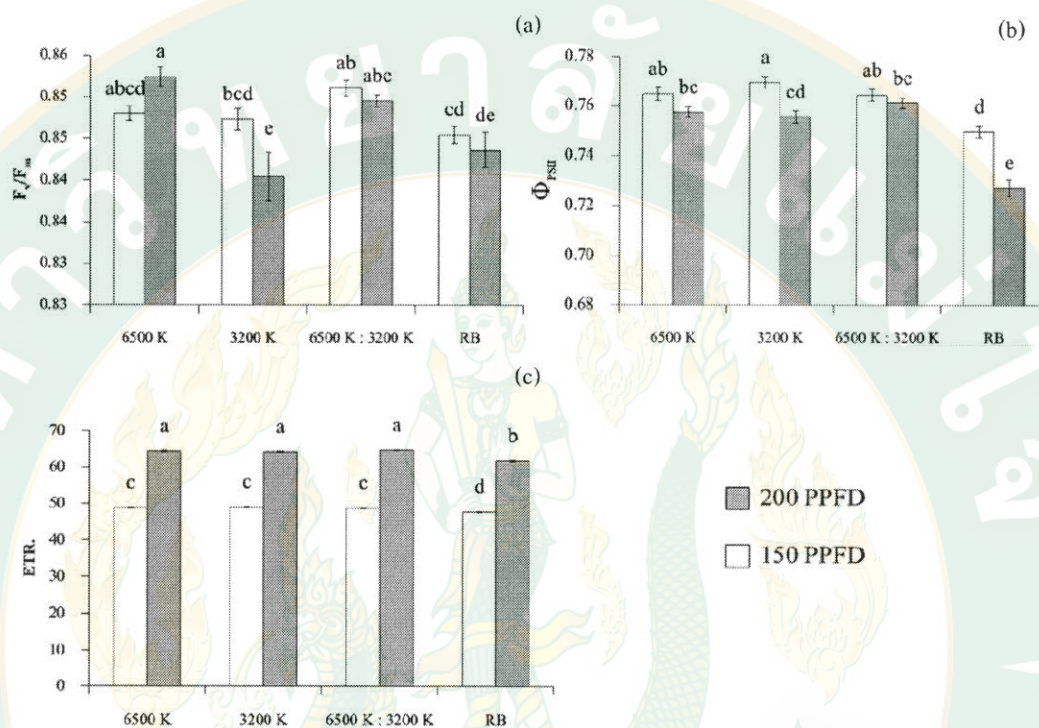
การศึกษาปริมาณ MDA ภายใต้คุณภาพแสง และความเข้มแสงที่ต่างกันพบว่า พืชเนี่ยที่ได้รับแสงทั้ง 4 ตำรับ ที่ระดับความเข้มแสง $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ มีปริมาณ MDA ในใบสูงกว่าการได้รับความเข้มแสง $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ต้นที่ได้รับแสง $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ทุกตำรับมีปริมาณ MDA ในใบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การได้รับความเข้มแสง $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ พบว่าต้นที่ได้รับแสง RB มีปริมาณ MDA ในใบสูงกว่า ตำรับ 6500 K อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 43d)



ภาพที่ 43 แสดงปริมาณ MDA ในใบพืชเนี่ยตั้งแต่อายุ 56-77 วันหลังเพาะเมล็ด โดยได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ตำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB และได้รับความเข้มแสง 2 ระดับ คือ $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ($n=3$) (a) และ $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ($n=3$) (b) แสดงค่าความชันของเส้นแนวโน้ม และทิศทางความสัมพันธ์ (ค่าความชันของเส้นแนวโน้มด้านลบ คือ อายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณ MDA ลดลง ค่าความชันของเส้นแนวโน้มด้านบวก คือ อายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณ MDA เพิ่มขึ้น) ปริมาณ MDA กับอายุพืช ($n=3$) (c) และเปรียบเทียบปริมาณ MDA ระหว่างความเข้มแสง 2 ระดับ ภายใต้คุณภาพแสงทั้ง 4 ตำรับของใบพืชเนี่ยในช่วงอายุ 70-77 วันหลังเพาะเมล็ด (d) ($n=4$) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

การศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณ MDA ในใบกับอายุพืชภายใต้คุณภาพแสง และความเข้มแสงที่แตกต่างกัน พบว่า อายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณ MDA ในใบลดต่ำลงเหมือนกันในทุกตำรับแสง ซึ่งการได้รับความเข้มแสง $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ของตำรับ 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มหรืออัตราการลดลงของปริมาณ MDA มากกว่าการได้รับ

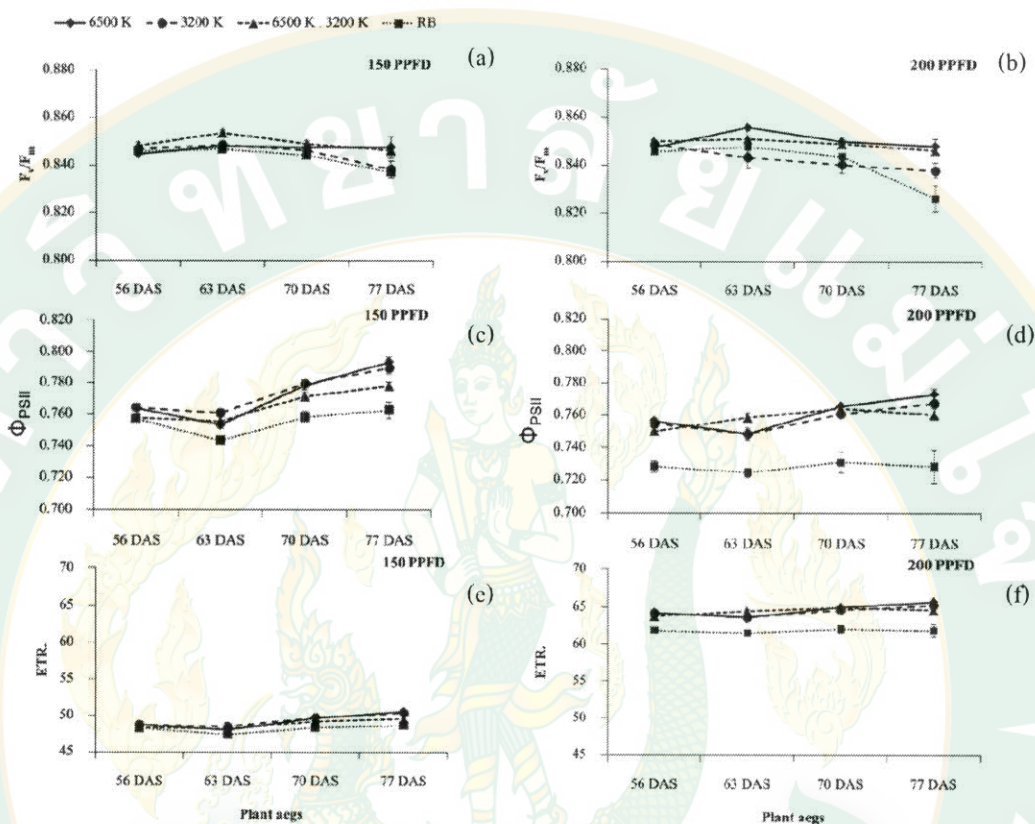
ความเข้มแสง 200 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยได้รับ RB ที่ระดับความเข้มแสง $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มหรืออัตราการลดลงของปริมาณ MDA ต่ำที่สุด (ภาพที่ 43a 43b และ 43c)



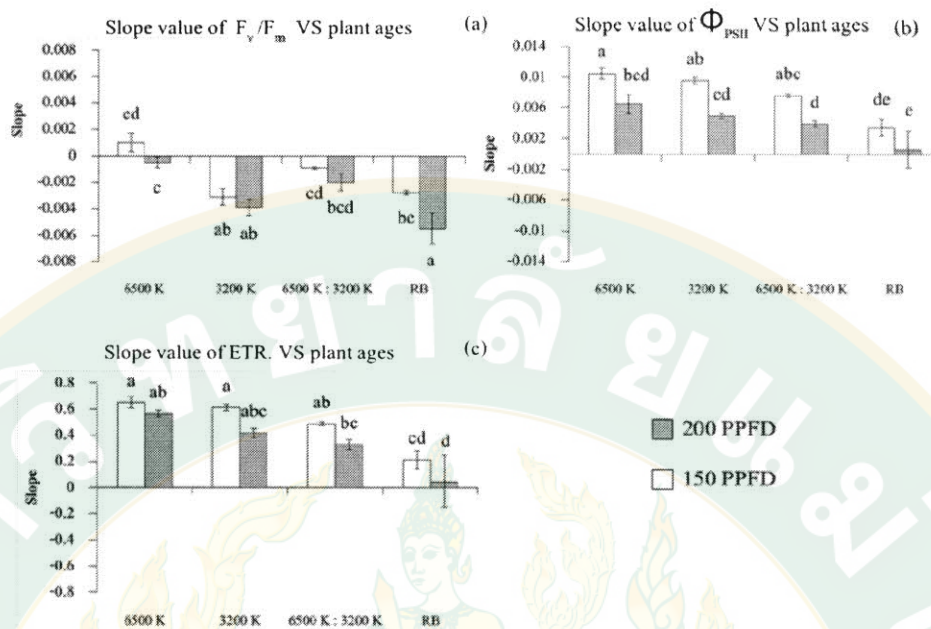
ภาพที่ 44 แสดงค่า F_v/F_m (a) Φ_{PSII} (b) และ ETR (Electron Transport Rate) (d) ของใบพืทูเนียในช่วงอายุ 63-70 วันหลังเพาะเมล็ด โดยได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ดำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB และได้รับความเข้มแสง 2 ระดับ คือ 200 และ $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE (n=28) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

การศึกษาประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII (F_v/F_m) ภายใต้คุณภาพแสง และความเข้มแสงที่แตกต่างกันของใบพืทูเนีย พบว่า ทุกดำรับมีค่า F_v/F_m อยู่ในช่วง 0.84-0.86 โดย ดำรับ 3200 K ที่ระดับความเข้มแสง $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ มีค่า F_v/F_m ต่ำที่สุด (ภาพที่ 44a) ส่วนค่าประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบ PSII ในสภาพสว่าง (Φ_{PSII}) และค่าอัตราการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (Electron Transport Rate หรือ ETR) พบว่า ดำรับ RB ที่ระดับความเข้มแสงเดียวกัน มีค่า Φ_{PSII} และ ETR ต่ำกว่าดำรับอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้อัตราการเคลื่อนย้าย

อิเล็กตรอนภายใต้ความเข้มแสง $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ของคุณภาพแสงทั้ง 4 ดำรับ ก็มีค่าสูงกว่าการได้รับความเข้มแสง $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 44b และ 44c)



ภาพที่ 45 แสดงประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII (maximum quantum efficiency) ได้แก่ F_v/F_m (a และ b) Φ_{PSII} (c และ d) และ ETR (e และ f) ของใบพืชเนี่ยตั้งแต่อายุ 56-77 วันหลังเพาะเมล็ด โดยได้รับความเข้มแสงที่แตกต่างกัน 4 ดำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB ได้รับความเข้มแสง 2 ระดับ คือ $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (a c และ e) และ $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (b d และ f) (n=12)



ภาพที่ 46 แสดงค่าความชันของเส้นแนวโน้ม และทิศทางความสัมพันธ์ (ค่าความชันของเส้นแนวโน้มด้านล่าง คือ อายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII ลดลง ค่าความชันของเส้นแนวโน้มด้านบน คือ อายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII เพิ่มขึ้น) ระหว่างประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII กับอายุพืช เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ($n=12$) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII กับอายุพืช ภายใต้คุณภาพแสง และความเข้มแสงที่ต่างกัน พบว่า อายุพืชที่เพิ่มขึ้นของต้นพิทูเนียภายใต้ตำรับ 6500 K และ 6500 K : 3200 K ที่ระดับความเข้มแสงทั้งสองระดับ ส่งผลต่อค่า F_v/F_m น้อยกว่าตำรับ 3200 K และ RB อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 45a และ 45b และภาพที่ 46a) ส่วนค่า Φ_{PSII} และ ETR มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน โดยอายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า Φ_{PSII} และ ETR เพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของ Φ_{PSII} และ ETR ภายใต้ความเข้มแสง 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ของคุณภาพแสงทุกตำรับ ต่ำกว่าการได้รับความเข้มแสง 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ ตำรับ RB มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Φ_{PSII} และ ETR ต่ำที่สุด (ภาพที่ 45c 45d และ 45e และภาพที่ 46b และ 46c)

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว สองทาง และสามทางของอายุพีช (A) คุณภาพแสง (B) และความเข้มแสง (C) ที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซ และประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII

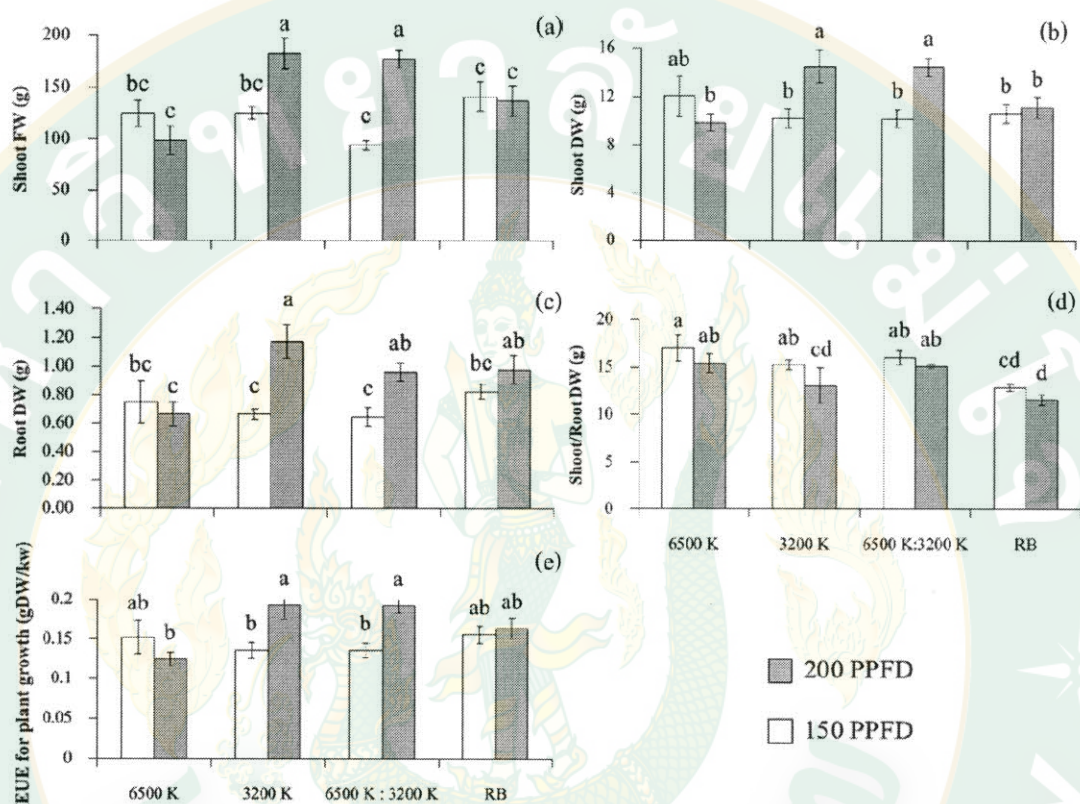
Dependent variables	Independent variables						
	A	B	C	A × B	A × C	B × C	A × B × C
A (n=12)	>0.01**	>0.01**	>0.01**	>0.01**	NS	NS	0.01*
E (n=12)	>0.01**	>0.01**	>0.01**	>0.01**	>0.01**	>0.01**	NS
g_s (n=12)	>0.01**	0.01*	NS	NS	0.048*	NS	NS
MDA. (n=3)	>0.01**	0.01*	>0.01**	0.01*	>0.01**	0.01*	>0.01**
F_v/F_m (n=12)	>0.01**	>0.01**	NS	>0.01**	NS	0.028*	NS
Φ_{PSII} (n=12)	>0.01**	>0.01**	>0.01**	>0.01**	>0.01**	>0.01**	NS
ETR. (n=12)	>0.01**	>0.01**	>0.01**	>0.01**	NS	>0.01**	NS

หมายเหตุ ตัวเลขที่ระบุในตารางแสดงค่า P (p-value) โดย $P < 0.01 = (**) มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ$ $P < 0.05 = (*) มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ$ $P \geq 0.05 = (NS) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ$

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว พบว่า อายุพีช และคุณภาพแสง ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดทั้งหมดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ความเข้มแสงไม่มีผลต่อค่าการนำไหลของปากใบ และ F_v/F_m แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 12)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกสองทางของปฏิสัมพันธ์ระหว่างอายุพีชกับคุณภาพแสง พบว่า อายุพีชที่ส่งผลต่อค่าการนำไหลของปากใบเหมือนกันภายใต้คุณภาพแสงทั้ง 4 ต่ำรับ ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างอายุพีชกับความเข้มแสง พบว่า อายุพีชที่แตกต่างกันส่งผลต่ออัตราการสังเคราะห์แสง (A) F_v/F_m และ ETR เหมือนกันในทุกความเข้มแสง ในส่วนของการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพแสงกับความเข้มแสง พบว่า คุณภาพแสงส่งผลต่ออัตราการสังเคราะห์แสงและค่าการนำไหลของปากใบเหมือนกันในทุกความเข้มแสง (ตารางที่ 12)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกสามทางของอายุพืช คุณภาพแสง และความเข้มแสง พบว่า ตัวแปรทั้ง 3 ไม่มีปฏิสัมพันธ์กันในการทำให้เกิดความแปรปรวนของค่าดัชนีที่ทำการวัดทั้งหมด ยกเว้นเพียงค่าอัตราการสังเคราะห์แสง และปริมาณ MDA (ตารางที่ 12)



ภาพที่ 47 แสดงมวลน้ำหนักสด (a) และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น (b) มวลน้ำหนักแห้งส่วนราก (c) สัดส่วนของมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้นต่อมวลน้ำหนักแห้งส่วนราก (d) และประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเป็นมวลสารแห้ง (e) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE (n=6) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตารางที่ 13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว และสองทางของคุณภาพแสง(A) และความเข้มแสง (B) ที่มีผลต่อมวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น มวลน้ำหนักแห้งราก สัดส่วนมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้นต่อมวลน้ำหนักแห้งส่วนราก และประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงเพื่อการเจริญเติบโตทางลำต้น และใบ (EUE for plant growth) (n=6)

Dependent variables	Independent variables		
	Light quality	Light Intensity	A x B
	(A)	(B)	
Shoot FW	0.01*	>0.01**	>0.01**
Shoot DW	NS	0.021*	>0.01**
Root DW	NS	>0.01**	0.017*
Shoot/Root DW	>0.01**	0.039*	NS
EUE for plant growth	NS	0.017*	>0.01**

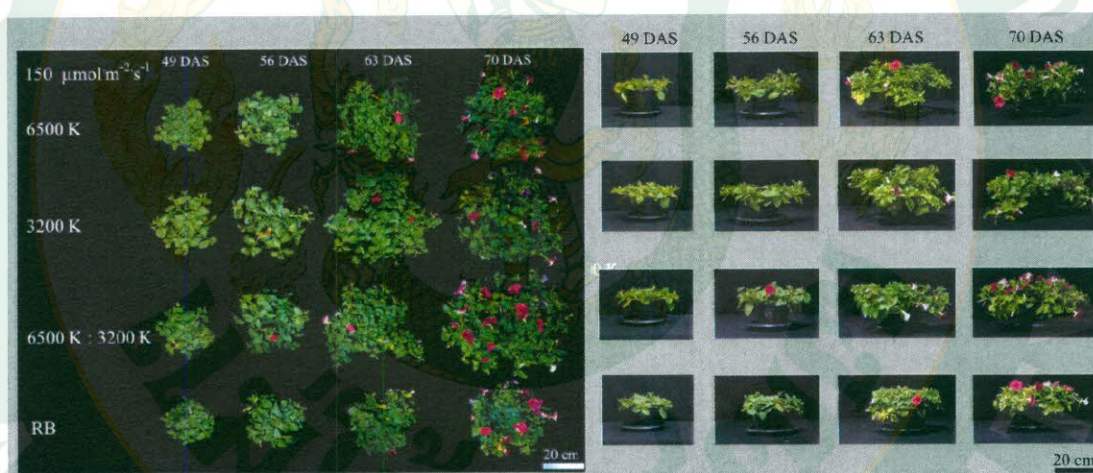
หมายเหตุ ตัวเลขที่ระบุในตารางแสดงค่า P (p-value) โดย $P < 0.01 = (**)$ มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง $P < 0.05 = (*)$ มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ $P \geq 0.05 = (NS)$ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

การศึกษามวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น มวลน้ำหนักแห้งส่วนราก และประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเป็นมวลสารแห้งของต้นพิทูเนียภายใต้คุณภาพแสง และความเข้มแสงที่แตกต่างกัน พบว่า พิตูเนียที่ได้รับความเข้มแสง $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ภายใต้คุณภาพแสงทั้ง 4 ต่ำรับนั้นมีค่าดัชนีทั้งหมดที่กล่าวมาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่พิตูเนียที่ได้รับความเข้มแสง $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ภายใต้คุณภาพแสง 3200 K และ 6500 K : 3200 K มีมวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น มวลน้ำหนักแห้งส่วนราก และประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงเพื่อการเจริญเติบโตทางลำต้น และใบ สูงกว่าต่ำรับอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 47) อีกทั้งมีลักษณะทรงพุ่มที่ใหญ่กว่าต่ำรับ 6500 K และ RB (ภาพที่ 48a และ 48b) นอกจากนี้ยังพบว่า คุณภาพแสงมีปฏิสัมพันธ์กับความเข้มแสง โดยอิทธิพลของคุณภาพแสงที่ส่งผลต่อมวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น มวลน้ำหนักแห้งส่วนราก และประสิทธิภาพการใช้

พลังงานแสงเพื่อการเจริญเติบโตทางลำต้น และใบ นั้นมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเข้มแสง (ตารางที่ 13)



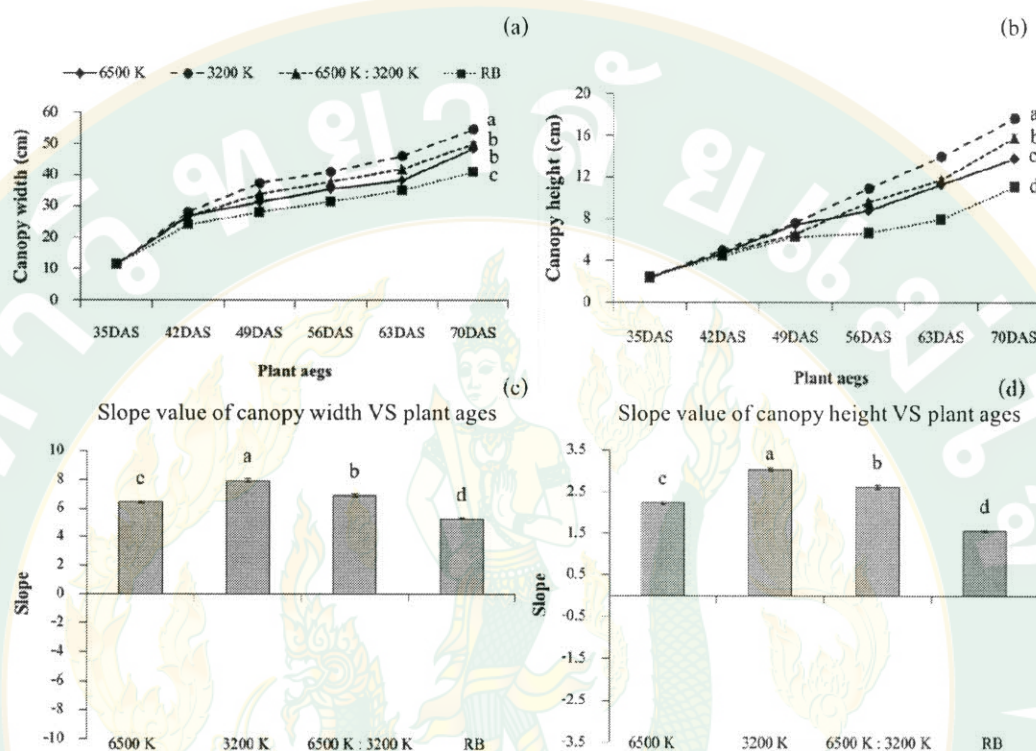
(a) $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$



(b) $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

ภาพที่ 48 แสดงลักษณะต้นพืชมินิ (ภาพชุดด้านซ้ายมือแสดงลักษณะมุมมองด้านบน และภาพชุดด้านขวามือแสดงมุมมองด้านข้าง) ที่ได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ตำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB และได้รับความเข้มแสง 2 ระดับ คือ $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (a) และ $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (b)

การทดลองที่ 4 อิทธิพลของคุณภาพแสง ต่อการเจริญเติบโต การออกดอก
การให้ผลผลิต และคุณภาพเมล็ดพันธุ์ของต้นพืทุเนย



ภาพที่ 49 แสดงความกว้าง (a) และความสูง (b) ของต้นพืทุเนยตั้งแต่อายุ 35-70 วันหลังเพาะเมล็ด โดยได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ตำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB และแสดงค่าความชันของเส้นแนวโน้ม และทิศทางความสัมพันธ์ (ค่าความชันของเส้นแนวโน้มด้านลบ คือ อายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดทรงพุ่มลดลง ค่าความชันของเส้นแนวโน้มด้านบวก คือ อายุพืชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดทรงพุ่มเพิ่มขึ้น) ของความกว้าง (c) และความสูง (d) กับอายุพืช เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE (n=12) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

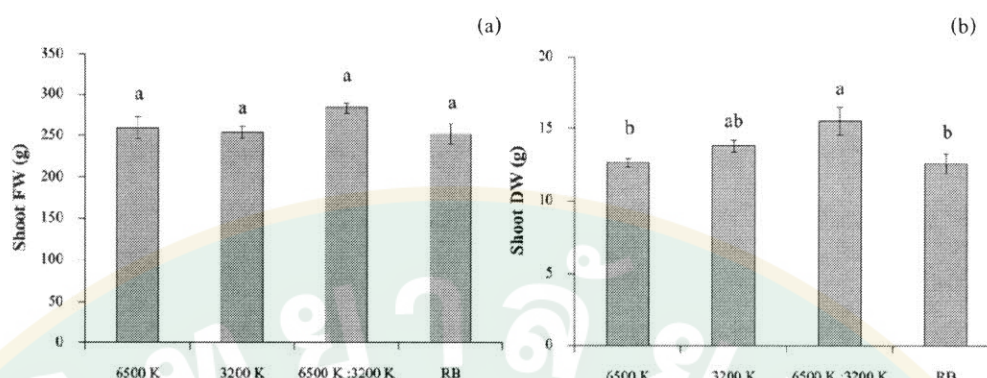
เมื่อศึกษาความกว้าง และความสูงของทรงพุ่มภายใต้คุณภาพแสงที่แตกต่างกัน พบว่า แสงในตำรับ 3200 K ส่งผลให้ทั้งความกว้าง และความสูงของต้นพืทุเนยที่มีอายุ 70 วันหลังเพาะเมล็ดมีค่ามากกว่าตำรับอื่น ๆ อีกทั้งมีค่าความชันของเส้นแนวโน้มหรืออัตราการขยายทรงพุ่มที่เร็วกว่า

ตำรับอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ตำรับ RB ส่งผลให้ต้นมีความกว้าง ความสูง และอัตราการขยายทรงพุ่มที่ต่ำที่สุด (ภาพที่ 49) เมื่อพิจารณาจากภาพของต้นพิทูเนียที่มีอายุ 77 วัน (ภาพที่ 50) จะเห็นได้ว่า ต้นพิทูเนียที่ได้รับแสงในตำรับ 3200 K มีลักษณะทรงพุ่มที่ใหญ่ และกิ่งด้านข้างมีลักษณะเลื้อยลงมาแตะกับพื้นที่วางกระถางของต้นพิทูเนีย จนไม่สามารถมองเห็นกระถางได้



ภาพที่ 50 แสดงลักษณะด้านข้างของต้นพิทูเนียที่มีอายุ 70 และ 77 วันหลังเพาะเมล็ด ที่ได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ตำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB

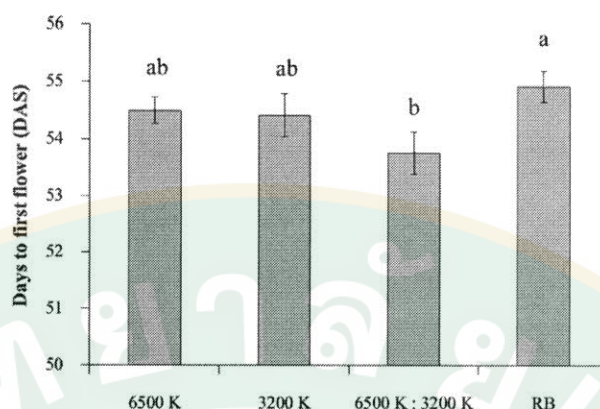
การศึกษามวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งภายใต้คุณภาพแสงที่แตกต่างกัน พบว่า มวลน้ำหนักสดภายใต้คุณภาพแสงทั้ง 4 ตำรับ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ภาพที่ 51a) ในขณะที่ มวลน้ำหนักแห้งของต้นที่ปลูกภายใต้ตำรับ 6500 K : 3200 K มีค่ามากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 51b)



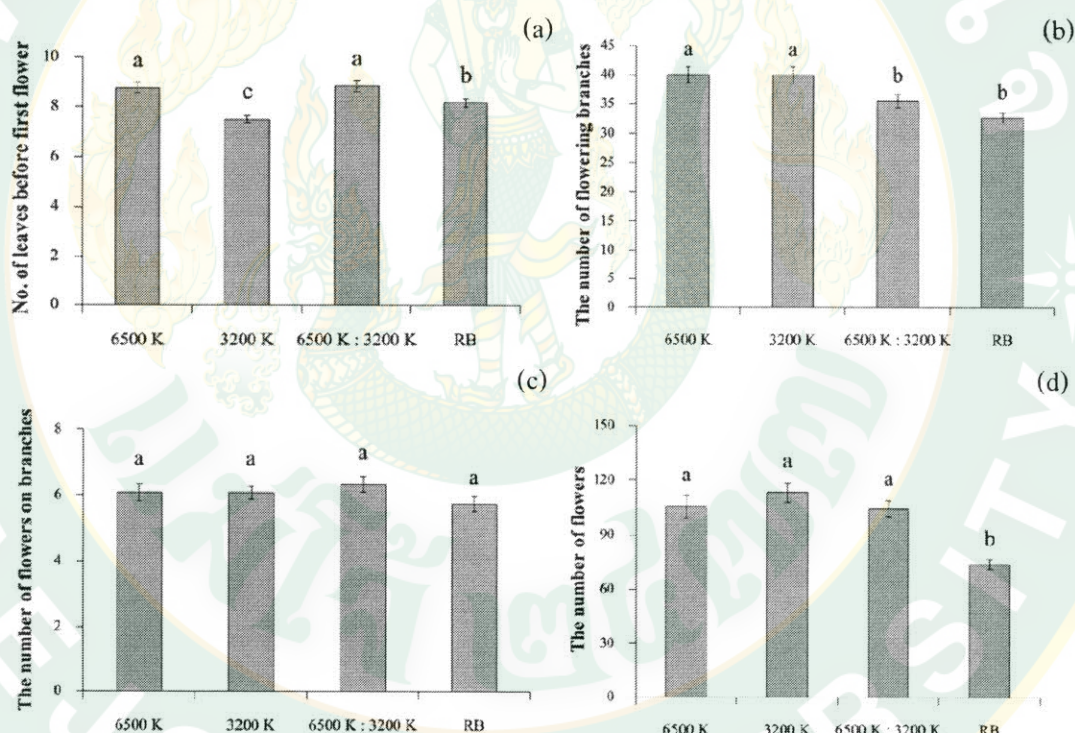
ภาพที่ 51 แสดงมวลน้ำหนักสด (a) และมวลน้ำหนักแห้งส่วนลำต้น (b) ของต้นพืทุเนียที่มีอายุ 80 วันหลังเพาะเมล็ด เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ($n=6$) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

จากการเก็บข้อมูลจำนวนวันก่อนการบานของดอกแรกหลังจากการเพาะเมล็ด พบว่า ต้นพืทุเนียที่ได้รับแสงตำรับ 6500 K 3200 K และ 6500 K : 3200 K มีจำนวนวันที่พบการบานของดอกแรกไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ ตำรับ RB มีจำนวนวันก่อนการบานของดอกแรกมากกว่า ตำรับ 6500 K : 3200 K อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 52)

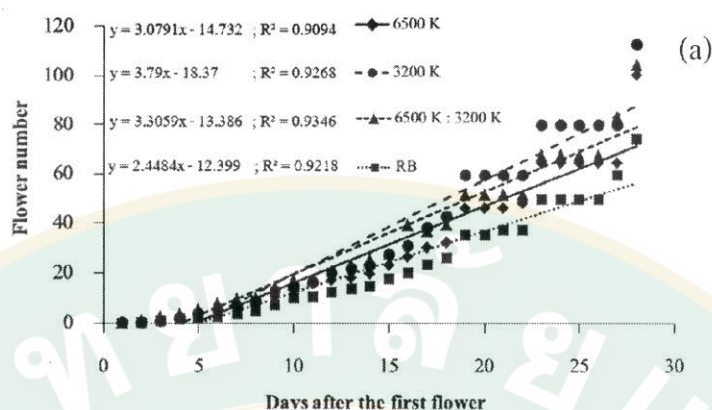
ในส่วนของจำนวนใบของกิ่งก่อนการบานของดอกแรก ภายใต้คุณภาพแสงที่แตกต่างกัน พบว่า ตำรับ 3200 K ส่งผลให้มีจำนวนใบของกิ่งก่อนการพบการบานของดอกแรกต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 53a) ส่วนจำนวนกิ่งที่ออกดอก พบว่า ตำรับ 6500 K และ 3200 K ไม่มีความแตกต่างกัน อีกทั้งมีค่ามากกว่าตำรับ 6500 K : 3200 K และ RB อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 53b) ส่วนจำนวนดอกต่อกิ่งพบว่า ต้นพืทุเนียที่ปลูกภายใต้แสงทั้ง 4 ตำรับ มีจำนวนดอกต่อกิ่งไม่แตกต่างกัน (ภาพที่ 53c) ในขณะที่จำนวนดอกต่อต้นของตำรับ RB มีค่าต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 53d)



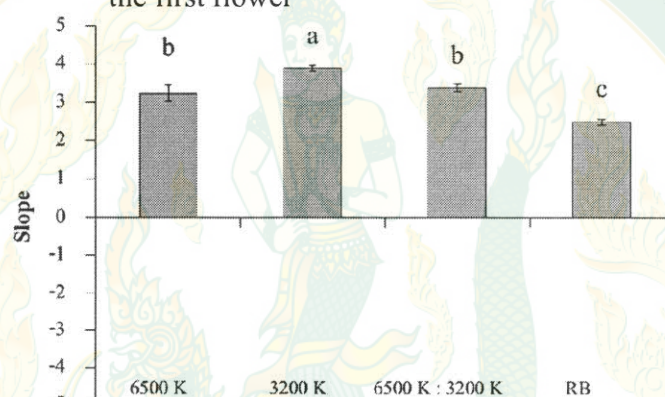
ภาพที่ 52 แสดงจำนวนวันก่อนดอกแรกบาน โดยนับวันแรกหลังจากเพาะเมล็ด เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE (n=14) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)



ภาพที่ 53 แสดงจำนวนใบของกิ่งก่อนการพบการออกดอกแรก (n=12) (a) จำนวนกิ่งที่ออกดอก (n=8) (b) จำนวนดอกต่อกิ่ง (n=9) (d) และจำนวนดอกต่อต้น (n=8) ของต้นพืชนีที่มีอายุ 79 วันหลังเพาะเมล็ด เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

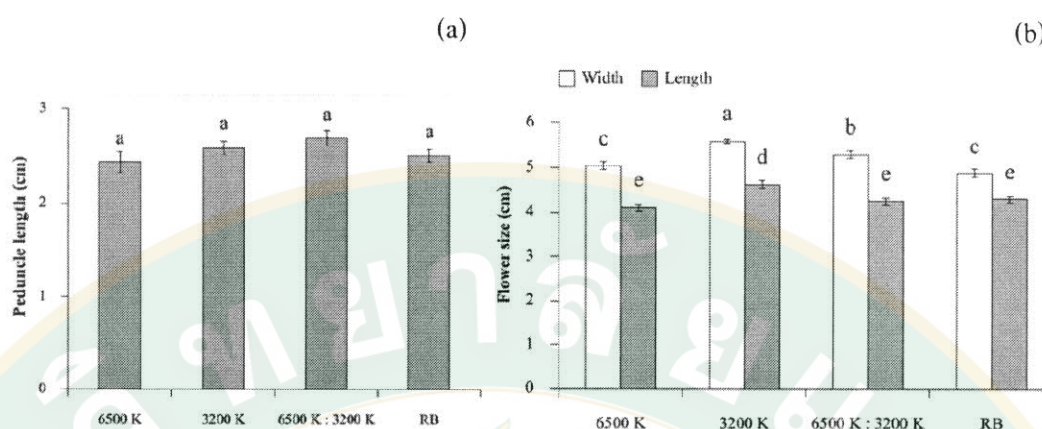


Slope value of flower number VS day after the first flower



ภาพที่ 54 แสดงจำนวนดอกในแต่ละวันต่อเนื่องเป็นเวลา 1 เดือน (ตั้งแต่อายุพืช 50-80 วันหลังเพาะเมล็ด) (a) และแสดงค่าความชันของเส้นแนวโน้ม (b) โดยได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ตำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE (n=8) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

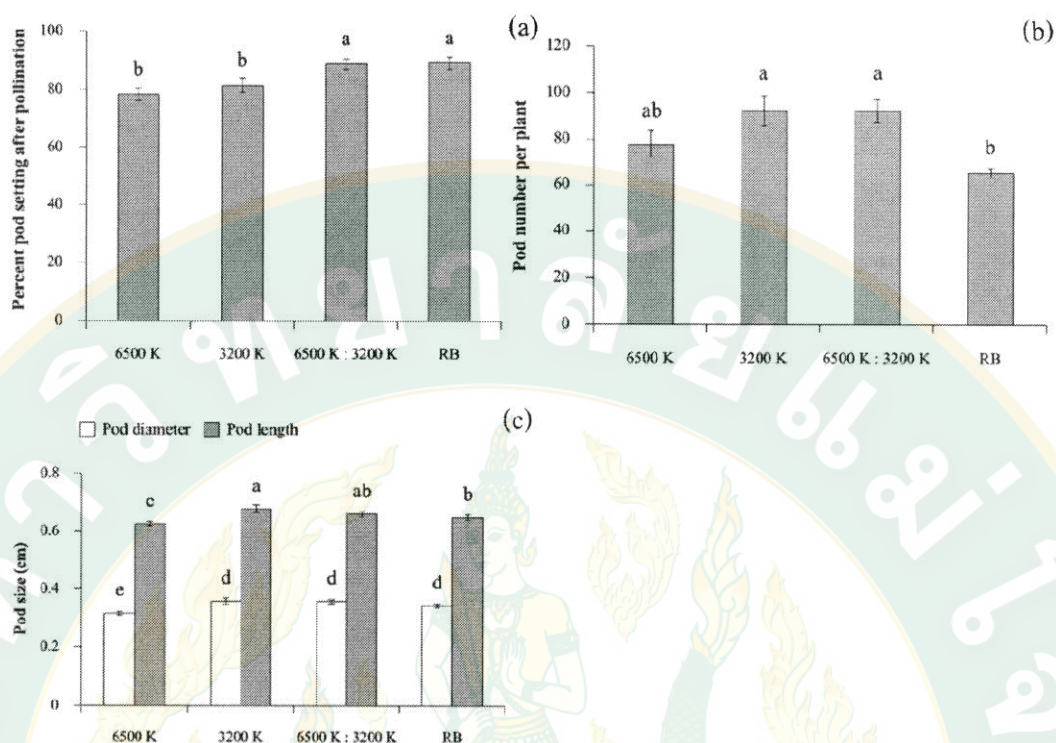
การศึกษาอัตราการออกดอก ภายใต้คุณภาพแสงที่แตกต่างกัน พบว่า ต้นพืชนึ่งที่ได้รับแสงตำรับ 3200 K มีอัตราการออกดอกสูงกว่าตำรับอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนตำรับ 6500 K และ 6500 K : 3200 K มีอัตราการออกดอกไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ ตำรับ RB มีอัตราการออกดอกต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 54)



ภาพที่ 55 แสดงความยาวก้านดอก (a) และขนาดดอก (b) ของต้นพืทุเนยที่ปลูกภายใต้แสง 4 ตำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ($n=12$) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

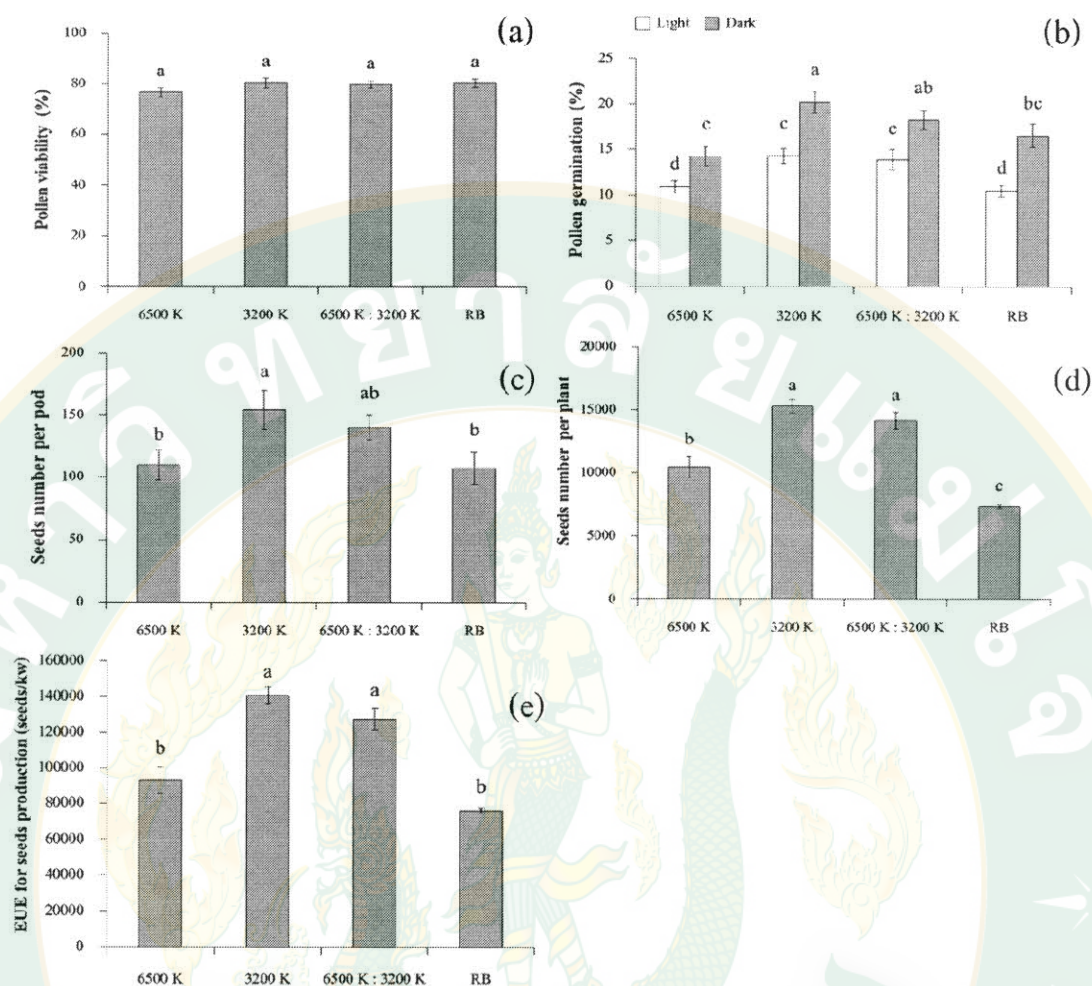
การศึกษาความยาวก้านดอก และขนาดดอก ภายใต้คุณภาพแสงที่ต่างกัน พบว่าคุณภาพแสงทั้ง 4 ตำรับไม่ส่งผลให้ความยาวก้านดอกมีความแตกต่างกัน (ภาพที่ 55a) ในขณะที่ขนาดดอกมีความกว้าง และความยาวมากที่สุดภายใต้ตำรับแสง 3200 K อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 55b)

ส่วนเปอร์เซ็นต์การติดฝักหลังจากการผสมเกสรภายใต้คุณภาพแสงที่ต่างกัน พบว่าต้นพืทุเนยที่ปลูกในแสงทุกตำรับมีเปอร์เซ็นต์การติดฝักสูงกว่า 70 % โดย ตำรับ 6500 K : 3200 K และ RB มีเปอร์เซ็นต์การติดฝักที่ไม่แตกต่างกัน และมีค่าสูงกว่าตำรับ 6500 K และ 3200 K อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 56a) ในขณะที่จำนวนฝักต่อต้นพบว่า ต้นที่ปลูกในตำรับ RB มีค่าต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ ตำรับ 6500 K 3200 K และ 6500 K : 3200 K ไม่มีความแตกต่างกัน (ภาพที่ 56b) ส่วนขนาดของฝัก พบว่า ตำรับ 3200 K ส่งผลให้มีขนาดฝักทั้งความกว้าง และความยาวของฝักมากที่สุด ในขณะที่ตำรับ 6500 K ส่งผลให้มีขนาดฝักทั้งความกว้าง และความยาวน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 57c)



ภาพที่ 56 แสดงเปอร์เซ็นต์การติดฝักหลังจากการผสมเกสร (n=8) (a) จำนวนฝักต่อต้น (n=8) (b) และขนาดฝัก (n=20) (c) ของต้นพืษุเนียบที่ปลูกภายใต้แสง 4 ดำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

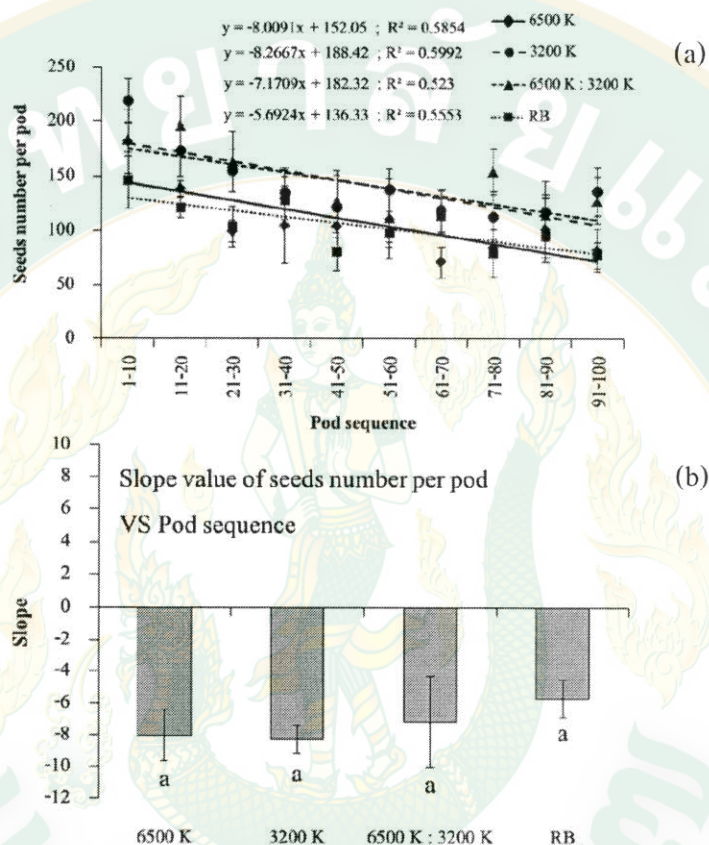
จากการศึกษาเปอร์เซ็นต์ความมีชีวิตของละอองเรณูภายใต้คุณภาพแสงที่ต่างกัน พบว่า ละอองเรณูมีเปอร์เซ็นต์ความมีชีวิตไม่แตกต่างกัน (ภาพที่ 57a) ในขณะที่เปอร์เซ็นต์ความออกของละอองเรณู จำนวนเมล็ดต่อฝัก และจำนวนเมล็ดต่อต้น มีลักษณะของข้อมูลที่สอดคล้องกัน คือ ดำรับ 3200 K ส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์ความงอกของละอองเรณู จำนวนเมล็ดต่อฝัก จำนวนเมล็ด และประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงเพื่อผลิตเมล็ดพันธุ์ต่อต้นที่ไม่แตกต่างกับดำรับ 6500 K : 3200 K แต่มีค่าสูงกว่าดำรับ 6500 K และ RB อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 57b 57c 57d และ 57e)



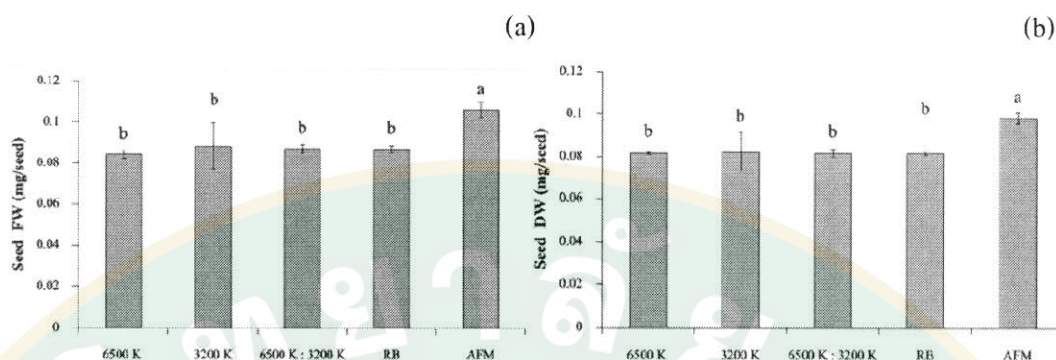
ภาพที่ 57 แสดงเปอร์เซ็นต์ความมีชีวิตของละอองเรณู (n=8) (a) เปอร์เซ็นต์ความงอกของละอองเรณู (n=30) (b) จำนวนเมล็ดต่อฝัก (n=5) (c) จำนวนเมล็ดต่อต้น (n=3) (d) และประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงเพื่อผลิตเมล็ดพันธุ์ (n=3) (e) ของต้นพืษุเนียบที่ปลูกภายใต้แสง 4 ดำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

การศึกษาจำนวนเมล็ดต่อฝักของต้นพืษุเนียบที่ปลูกภายใต้คุณภาพแสงที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อลำดับของฝักเพิ่มมากขึ้นจำนวนเมล็ดต่อฝักภายใต้คุณภาพแสงทุกตำรับมีค่าลดลง (ภาพที่ 58a) อย่างไรก็ตาม อัตราการลดลงของจำนวนเมล็ดต่อฝักภายใต้แสงทั้ง 4 ตำรับ ไม่มีความแตกต่างกัน (ภาพที่ 58b)

ในการศึกษามวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งของเมล็ดภายใต้คุณภาพแสงที่ต่างกัน พบว่า คุณภาพแสงทั้ง 4 ตำรับ ไม่ส่งผลให้มีมวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งแตกต่างกัน แต่มีค่าน้อยกว่าเมล็ดที่ผลิตในแปลงโดยบริษัท AFM (ภาพที่ 59a และ 59b)

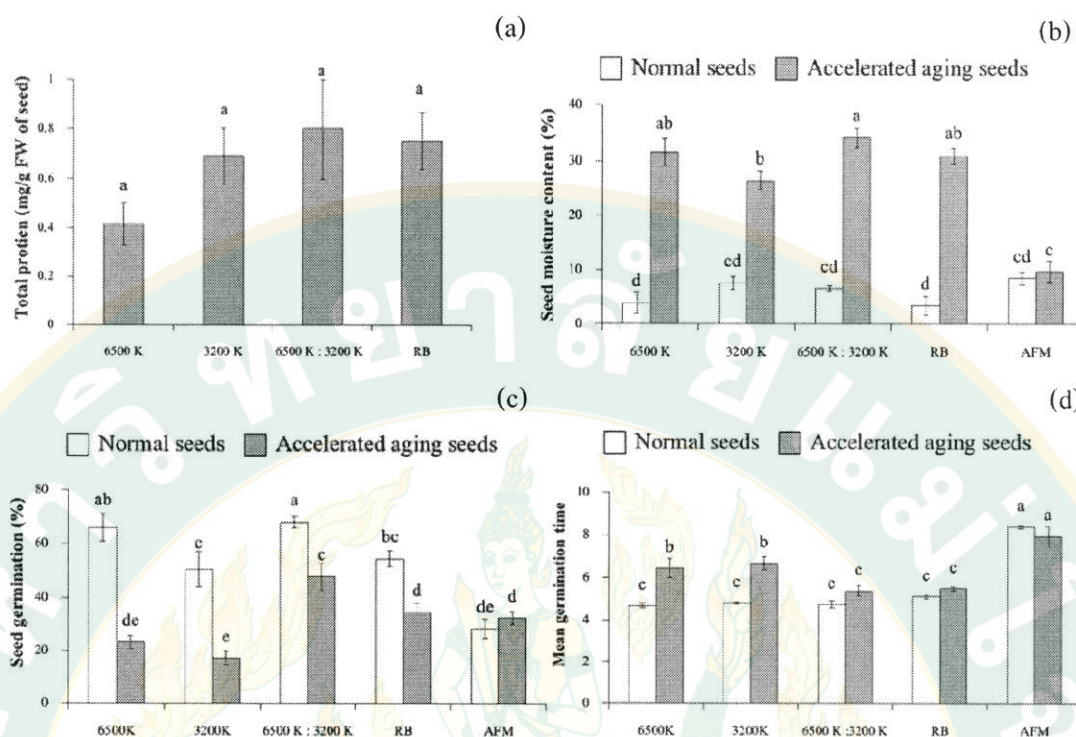


ภาพที่ 58 แสดงจำนวนเมล็ดต่อฝัก (ตั้งแต่ฝักที่1-ฝักที่100) (a) และแสดงค่าความชันของเส้นแนวโน้ม (b) ของต้นพืชเนยที่ได้รับคุณภาพแสงที่ต่างกัน 4 ตำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE (n=4) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)



ภาพที่ 59 แสดงมวลน้ำหนักสดของเมล็ด (a) และมวลน้ำหนักแห้งของเมล็ด (b) โดยได้รับคุณภาพแสงที่แตกต่างกัน 4 ตำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K RB และเมล็ดที่ผลิตโดยบริษัท เอ เอฟ เอ็ม ฟลาวเวอร์ ซีดส์ จำกัด ประเทศไทย (AFM) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE (n=4) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

การศึกษาปริมาณโปรตีนในเมล็ดภายใต้คุณภาพแสงที่แตกต่างกัน พบว่า คุณภาพแสงทั้ง 4 ตำรับ ไม่ส่งผลให้มีปริมาณโปรตีนในเมล็ดแตกต่างกัน (ภาพที่ 60a) ส่วนความชื้นเมล็ด พบว่า เมล็ดพิทูเนียปกติทั้ง 4 ตำรับ รวมทั้งเมล็ดจากบริษัท AFM มีความชื้นไม่เกิน 10 % และไม่มี ความแตกต่างกัน ในขณะที่เมล็ดพิทูเนียที่ผ่านการเร่งอายุมีความชื้นเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 30 % ยกเว้น เมล็ดของบริษัท AFM ที่มีความชื้นเท่ากับเมล็ดปกติ (ภาพที่ 60b) เมื่อทำการทดสอบเปอร์เซ็นต์ ความงอก พบว่า ทั้งเมล็ดปกติ และเมล็ดที่ผ่านการเร่งอายุของตำรับ 6500 K : 3200 K มีเปอร์เซ็นต์ ความงอกสูงกว่าตำรับอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 60c) นอกจากนี้ค่าเฉลี่ยจำนวนวัน ที่ใช้ในการงอก พบว่า ทั้งเมล็ดปกติ และเมล็ดที่ผ่านการเร่งอายุเมล็ดจากบริษัท AFM มีจำนวนวัน ที่ใช้ในการงอกมากที่สุด หรือมีการงอกช้าที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่เมล็ดปกติที่ผลิต ภายใต้คุณภาพแสงทั้ง 4 ตำรับ มีจำนวนวันที่ใช้ในการงอกไม่แตกต่างกัน (ภาพที่ 60d)



ภาพที่ 60 แสดงปริมาณโปรตีนในเมล็ด (a) ความชื้นเมล็ด (b) เปอร์เซ็นต์ความงอก (c) และค่าเฉลี่ยจำนวนวันที่ใช้ในการงอก (d) ของต้นพื้ญเญีที่ด้รับช่วงแสงที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $\pm$ SE (n=3) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ค่าเฉลี่ยที่ระบุด้วยอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบ pearson ระหว่างคุณภาพแสงกับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต การออกดอก และการติดฝัก พบว่า ความกว้าง และความสูงของทรงพุ่มมีความสัมพันธ์กับคุณภาพแสงในช่วง 500-600 nm และ 700-800 nm ในทิศทางบวก โดยเมื่อแสงมีส่วนประกอบของช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวมากขึ้นเรื่อยๆ จะส่งผลให้ความกว้าง และความสูงของทรงพุ่มเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ช่วงความยาวคลื่น 400-500 nm และ 600-700 nm มีความสัมพันธ์กับ ความกว้าง และความสูง ในทิศทางลบโดยเมื่อแสงที่มีส่วนประกอบของช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวมากขึ้นเรื่อยๆ จะส่งผลให้ความกว้าง และความสูงของทรงพุ่มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนความสัมพันธ์กับการออกดอกพบว่า ช่วงความยาวคลื่น 700-800 nm มีความสัมพันธ์ในทิศทางลบกับจำนวนวันก่อนดอกแรกบาน และจำนวนใบบนกิ่งก่อนพบดอกแรกบาน โดยแสงที่มีส่วนประกอบของช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวมากขึ้นส่งผลให้

ตารางที่ 14 สรุปผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบ Pearson ระหว่างคุณภาพแสงกับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต การออกดอก และการติดฝัก The number of LBBA คือ จำนวนใบบนกิ่งก่อนพบดอกแรกบาน (The number of leaves on a branch before anthesis) The number of FBPP คือ จำนวนกิ่งที่พบการออกดอกต่อต้น (The number of flowering branches per plant) The number of FPB คือ จำนวนดอกต่อกิ่ง (The number of flowers per branch) และ The number of FPP คือ จำนวนดอกต่อต้น (The number of flowers per plant)

Parameters	Light wavelength			
	400-500	500-600	600-700	700-800
	nm	nm	nm	nm
Shoot FW	NS	NS	NS	NS
Shoot DW	NS	NS	NS	NS
Canopy width (cm)	-0.811**	0.781**	-0.558**	0.835**
Canopy height (cm)	-0.879**	0.763**	-0.500**	0.898**
Days to first flower (DAS)	0.391**	-0.345*	0.230	-0.401**
The number of LBBA	0.340*	NS	-0.295*	-0.304*
The number of FBPP	NS	0.557**	-0.515**	0.379*
The number of FPB	NS	NS	NS	NS
The number of FPP	-0.579**	0.742**	-0.629**	0.616**
Peduncle length (cm)	NS	NS	NS	NS
Petal length (cm)	-0.489**	NS	NS	0.458**
Petal width (cm)	-0.696**	0.483**	NS	0.697**
% of pod yield after pollination	NS	-0.370*	0.401*	NS
Pod number per plant	-0.569**	0.546**	-0.389*	0.589**
Pod width (cm)	-0.440**	NS	NS	0.427**
Pod Length (cm)	NS	NS	NS	NS

หมายเหตุ (NS) ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ

(*) มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$

(**) มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งที่ $P < 0.01$

ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ช่วงความยาวคลื่น 700-800 nm มีความสัมพันธ์ในทิศทางบวกกับจำนวนกิ่งที่พบการออกดอก จำนวนดอกต่อต้น ความกว้างดอก ความยาวดอก จำนวนฝักต่อต้น และความกว้างฝัก โดยเมื่อแสงมีส่วนประกอบของช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ช่วงความยาวคลื่น 400-500 nm มีความสัมพันธ์ในทิศทางลบกับจำนวนดอกต่อต้น ความกว้างดอก ความยาวดอก จำนวนฝักต่อต้น และความกว้างฝัก โดยเมื่อแสงมีส่วนประกอบของช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 14)

ตารางที่ 15 สรุปผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบ Pearson ระหว่างคุณภาพแสงกับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับผลผลิตเมล็ด และคุณภาพเมล็ด MGT คือ ค่าเฉลี่ยจำนวนวันที่ใช้ในการงอก (Mean germination time; MGT)

Parameters	Light wavelength			
	400-500	500-600	600-700	700-800
	nm	nm	nm	nm
Pollen viability (%)	NS	NS	NS	NS
Pollen germination (%)	-0.545**	0.333**	-0.240*	0.549**
Seeds number per pod	-0.609**	NS	NS	0.607**
Seeds number per plant	-0.909**	0.798**	NS	0.930**
Seed FW (mg/seed)	NS	NS	NS	NS
Seed DW (mg/seed)	NS	NS	NS	NS
Protein content in seed	NS	NS	NS	NS
Seed germination (%)	NS	NS	NS	NS
MGT	NS	-0.692*	0.719**	NS

หมายเหตุ (NS) ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ

(*) มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$

(**) มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งที่ $P < 0.01$

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบ Pearson ระหว่างคุณภาพแสงกับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับผลผลิตเมล็ด และคุณภาพเมล็ด พบว่า คุณภาพแสงในช่วงความยาวคลื่น 700-800 nm มีความสัมพันธ์ในทิศทางบวกกับ เปอร์เซ็นต์ความงอกของละอองเรณู จำนวนเมล็ดต่อฝัก และจำนวนเมล็ดต่อต้น โดยเมื่อแสงมีส่วนประกอบของช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ช่วงความยาวคลื่น 400-500 nm มีความสัมพันธ์ในทิศทางลบกับเปอร์เซ็นต์ความงอกของละอองเรณู จำนวนเมล็ดต่อฝัก และจำนวนเมล็ดต่อต้น โดยเมื่อแสงมีส่วนประกอบของช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ช่วงความยาวคลื่น 600-700 nm มีความสัมพันธ์ในทิศทางบวกกับค่าเฉลี่ยจำนวนวันที่ใช้ในการงอก โดยเมื่อแสงมีส่วนประกอบของช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวมากขึ้นจะส่งผลให้เมล็ดที่ผลิตได้มีค่าเฉลี่ยจำนวนวันที่ใช้ในการงอกเพิ่มมากขึ้น หรือมีอัตราการงอกช้าลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 15)

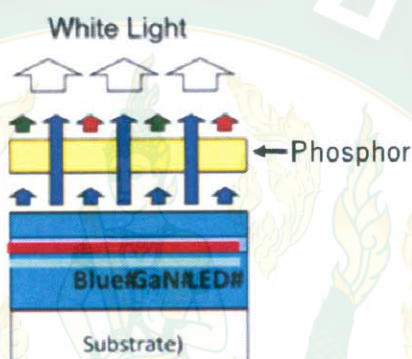
บทที่ 5

วิจารณ์ และสรุปผลการทดลอง

คุณภาพแสงเชิงสเปกตรัมของหลอดแอลอีดี

แสงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช พลังงานแสงจะถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานเคมี สำหรับนำไปใช้ในกระบวนการตรึง CO_2 และสร้างน้ำตาล ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการเจริญเติบโตของพืช (สมบุญ, 2548) พืชโดยทั่วไปมีกระบวนการเก็บเกี่ยวพลังงานแสงคล้ายคลึงกัน โดยมีรงควัตถุคลอโรฟิลล์เอและคลอโรฟิลล์บี ที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงสีน้ำเงินได้ดีเป็นพิเศษที่ความยาวคลื่น 428 and 453 nm ตามลำดับ และช่วงแสงสีแดงที่ความยาวคลื่น 661 and 642 nm ตามลำดับ (Lichtenthaler and Buschmann, 2001) จากการตรวจวัดสเปกตรัมของแสงหลอด LED ทั้ง 4 ดำรับ ได้แก่ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K และ RB (Red and Blue) พบว่า เส้นกราฟสเปกตรัมมีลักษณะเป็นลูกคลื่น 2 ลูก (ภาพที่ 16) โดยมีจุดสูงสุดของเส้นกราฟในลูกคลื่นที่ 1 คือ 446 450 447 และ 446 nm ตามลำดับ และจุดสูงสุดของเส้นกราฟในลูกคลื่นที่ 2 ที่ 544 591 580 และ 664 nm ตามลำดับ (ตารางที่ 2) โดยจุดสูงสุดของเส้นกราฟในลูกคลื่นที่ 1 ของดำรับ 6500 K 3200 K 6500 K : 3200 K ซึ่งเป็น LED ที่เปล่งแสงสีขาว มีความใกล้เคียงกันกับ ของดำรับ RB ซึ่งเปล่งแสงเฉพาะสีน้ำเงิน และสีแดงเท่านั้น อาจเนื่องจากชิปของ LED ที่เปล่งแสงสีขาวเป็นชิปชนิดเดียวกันกับแสงในดำรับ RB ที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำของ Gallium nitride (GaN) ซึ่งมีคุณสมบัติในการเปล่งแสงสีน้ำเงิน แต่ในหลอด LED สีขาวนั้น ตัวชิปถูกเคลือบด้วยฟอสฟอรัส (Phosphor) ส่งผลให้เปล่งแสงสีน้ำเงิน สีเขียว และสีแดงออกมาผสมกันจนเกิดเป็นแสงสีขาวออกมา (Denbaars et al., 2013) (ภาพที่ 61) อย่างไรก็ตาม จุดสูงสุดของเส้นกราฟในลูกคลื่นที่ 1 ของทุกดำรับมีความใกล้เคียงกับความสามารถในการดูดกลืนแสงสีน้ำเงินได้ดีเป็นพิเศษของคลอโรฟิลล์เอ และคลอโรฟิลล์บี ส่วนจุดสูงสุดของเส้นกราฟในลูกคลื่นที่ 2 ของ LED ที่เปล่งแสงสีขาว ในดำรับ 6500 K มีจุดสูงสุดของเส้นกราฟอยู่ในช่วงแสงสีเขียว ส่วน 3200 K และ 6500 K : 3200 K มีจุดสูงสุดของเส้นกราฟอยู่ในช่วงแสงสีเหลือง และส้ม ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกับดำรับ RB ที่มีจุดสูงสุดของเส้นกราฟในลูกคลื่นที่ 2 อยู่ในช่วงแสงสีแดง (ตารางที่ 2) ที่มีความใกล้เคียงกับความสามารถในการดูดกลืนแสงสีแดงได้ดีเป็นพิเศษของคลอโรฟิลล์เอ และคลอโรฟิลล์บี อย่างไรก็ตาม LED ที่เปล่งแสงสีขาวทั้ง 3 ดำรับ นั้นยังมีส่วนประกอบของแสงสีแดงในช่วงความยาวคลื่น 600 -700 nm อยู่ด้วยโดยดำรับ 6500 K พบว่า มีเปอร์เซ็นต์ของช่วงความยาวคลื่นแสงสีแดงต่ำกว่าดำรับ 3200 K อาจเนื่องจากคุณสมบัติของฟอสฟอรัสที่ใช้ในการเคลือบมีความ

แตกต่างกันส่งผลให้ปริมาณ และสัดส่วนของคุณภาพแสงมีความแตกต่างกันไปด้วย (Liu et al., 2009) ในขณะที่ตำรับ RB มีเปอร์เซ็นต์ของช่วงความยาวคลื่นแสงสีแดงมากที่สุด เนื่องจากการเปล่งแสงสีแดงมาจากสารกึ่งตัวนำที่เปล่งแสงเฉพาะสีแดงเท่านั้น ซึ่งมีความแตกต่างจากตำรับ 6500 K 3200 K และ 6500 K : 3200 K ที่ใช้สารกึ่งตัวนำที่ให้แสงสีน้ำเงินเป็นแสงตั้งต้น แล้วเคลือบด้วยฟอสฟอรัสจนเกิดเป็นแสงสีขาวที่มีแสงสีแดงเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย (Denbaars et al., 2013)



ภาพที่ 61 แสดงหลักการแปลงแสงสีขาวจากแหล่งกำเนิดแสงของสารกึ่งตัวนำชนิด Gallium nitride

ที่มา: Denbaars et al. (2013)

อิทธิพลของช่วงแสงจากหลอดแอลอีดีต่อการเจริญเติบโตของต้นพืชน้ำ

1. อิทธิพลของช่วงแสงต่อการเจริญเติบโตทางลำต้น และใบของต้นพืชน้ำในระยะต้นกล้า (ช่วงอายุ 30 วันหลังจากเพาะเมล็ด)

ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากต้นพืชน้ำที่ปลูกภายใต้ช่วงแสง 16 ชั่วโมง มีลักษณะโครงสร้างของใบที่มีความหนามากที่สุด (ตารางที่ 7 และภาพที่ 23) ซึ่งส่งผลให้แรงควัตุที่เกี่ยวข้องกับการเก็บเกี่ยวพลังงานแสงต่อพื้นที่ หรือต่อปริมาตรของใบมีค่ามากกว่าการได้รับช่วงแสงอื่น ๆ (ภาพที่ 26c) นอกจากนี้ยังเห็นได้จากค่า F_m (ภาพที่ 27c) ที่มีค่าสูงที่สุด ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงคลอโรฟิลล์ที่มีปริมาณมาก เมื่อทำการตรวจวัดประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII ทั้ง F_v/F_m และ Φ_{PSII} จึงมีค่าสูงไปด้วย (ภาพที่ 27a และ 27d) ดังนั้นลักษณะของใบพืชน้ำที่พัฒนาการมาจากการได้รับช่วงแสง 16 ชั่วโมง จึงมีประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานแสง และการนำแสงไปใช้ในกระบวนการตรึง CO_2 สูงกว่าใบของต้นที่ได้รับช่วงแสงในตำรับอื่น ๆ นอกจากนี้ การได้รับช่วงแสง 16 ชั่วโมงต่อวัน ทำให้ต้นพืชน้ำมีระยะเวลาในการใช้พลังงานแสงเพื่อตรึง CO_2 มากกว่าการได้รับช่วงแสง 8 และ 12

ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งเห็นได้จากค่าผลรวมต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ใบต่อช่วงแสงที่ได้รับในหนึ่งวัน ของการได้รับช่วงแสง 16 h ที่มีค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซทั้งอัตราการสังเคราะห์ สูงกว่าการได้รับช่วงแสงอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 28b 28d และ 28f)

ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากต้นพิทูเนียที่ปลูกภายใต้ช่วงแสง 16 ชั่วโมง มีลักษณะโครงสร้างของใบที่มีความหนามากที่สุด (ตารางที่ 7 และภาพที่ 23) ซึ่งส่งผลให้รงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับการเก็บเกี่ยวพลังงานแสงต่อพื้นที่ หรือต่อปริมาตรของใบมีค่ามากกว่าการได้รับช่วงแสงอื่น ๆ (ภาพที่ 26c) นอกจากนี้ยังเห็นได้จากค่า F_m (ภาพที่ 27c) ที่มีค่าสูงที่สุด ซึ่งบ่งชี้ถึงคลอโรฟิลล์ที่มีปริมาณมาก เมื่อทำการตรวจวัดประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII ทั้ง F_v/F_m และ Φ_{PSII} จึงมีค่าสูงไปด้วย (ภาพที่ 27a และ 27d) ดังนั้นลักษณะของใบพิทูเนียที่พัฒนาการมาจากการได้รับช่วงแสง 16 ชั่วโมง จึงมีประสิทธิภาพสูงกว่าการได้รับช่วงแสงในตำรับอื่น ๆ ในการเก็บเกี่ยวพลังงานแสง และประสิทธิภาพการนำแสงไปใช้ในกระบวนการตรึง CO_2 ต่อไป นอกจากนี้ การได้รับช่วงแสง 16 ชั่วโมงต่อวัน มีระยะเวลาในการใช้พลังงานแสงเพื่อตรึง CO_2 มากกว่าการได้รับช่วงแสง 8 และ 12 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งเห็นได้จากค่าผลรวมต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ใบต่อช่วงแสงที่ได้รับในหนึ่งวัน ของการได้รับช่วงแสง 16 h มีค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซทั้งอัตราการสังเคราะห์ สูงกว่าการได้รับช่วงแสงอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 28b 28d และ 28f)

2. อิทธิพลของช่วงแสงต่อการเจริญเติบโตทางลำต้น ใบ ดอก และผลผลิตเมล็ดของต้นพิทูเนีย

ปัจจัยทางสภาพแวดล้อมมีอิทธิพลต่อการออกดอกของต้นพิทูเนีย โดยจะออกดอกได้มากเมื่อได้รับปัจจัยบางอย่างมากเป็นพิเศษ เช่น ได้รับช่วงแสงวันยาว ความเข้มแสงสูง หรืออุณหภูมิต่ำ เป็นต้น (Adams et al. 1999) จากการทดลองพบว่า การให้ช่วงแสง 16 ชั่วโมงต่อวัน ส่งผลให้ต้นพิทูเนียออกดอกไว (ภาพที่ 33a) มีจำนวนดอก (ภาพที่ 33c) มากกว่าการได้รับช่วงแสง 8 และ 12 ชั่วโมง และส่งผลให้ผลผลิตฝัก (ภาพที่ 33e) และจำนวนเมล็ดต่อต้น (ภาพที่ 35b) สูงตามไปด้วย ทั้งนี้การได้รับช่วงแสง 8 และ 12 ชั่วโมงต่อวัน จะส่งเสริมการเจริญทางลำต้นมากกว่าการออกดอก โดยมีแนวโน้มของมวลน้ำหนักราก และมวลน้ำหนักรากแห้งสูงในช่วงที่มีการออกดอก อีกทั้งจำนวนข้อใบบนกิ่งก่อนที่พบการออกดอกแรกมากกว่าต้นพิทูเนียที่ได้รับช่วงแสง 16 ชั่วโมงต่อวัน (ภาพที่ 32b และ 32b)

เมล็ดที่ได้จากต้นพิทูเนียที่เจริญเติบโตภายใต้แสง 16 ชั่วโมงต่อวัน มีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์ความงอกต่ำกว่าเมล็ดที่ได้จากต้นพิทูเนียที่เจริญเติบโตภายใต้แสง 8 และ 12 ชั่วโมงต่อวัน (ภาพที่ 36c) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากจำนวนดอก จำนวนฝัก (ภาพที่ 33c และ 33e) และจำนวนเมล็ดต่อต้นที่มีปริมาณมาก (ภาพที่ 35b) ทำให้ต้นพิทูเนียมีภาระในการหล่อเลี้ยงดอก ฝัก และเมล็ดมากขึ้น จึงส่งผลให้เมล็ดมีการสะสมอาหารไว้ได้น้อย ซึ่งจะเห็นได้จากมวลน้ำหนักรากแห้งของเมล็ด ที่มีค่าต่ำ

กว่าตำรับอื่น ๆ (ภาพที่ 35d) ในขณะที่ต้นพิทูเนียที่เจริญเติบโตภายใต้แสง 8 และ 12 ชั่วโมงต่อวัน มีจำนวนดอก จำนวนฝัก และจำนวนเมล็ดต่อต้นที่ต่ำกว่าต้นพิทูเนียที่เจริญเติบโตภายใต้แสง 16 ชั่วโมงต่อวัน อย่างไรก็ตามเปอร์เซ็นต์ความงอกของเมล็ดจากต้นพิทูเนียที่เจริญเติบโตภายใต้ช่วงแสงทั้ง 3 ตำรับ มีเปอร์เซ็นต์ความงอกต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการนำเมล็ดสดที่เก็บมาจากต้นพิทูเนีย แล้วนำมาทดสอบเปอร์เซ็นต์ความงอกทันที โดยไม่ผ่านกระบวนการทำลายการพักตัวของเมล็ดพิทูเนีย (Sink, 1984)

อิทธิพลของคุณภาพ และความเข้มแสงจากหลอดแอลอีดี

ต่อการเจริญเติบโตของต้นพิทูเนีย

1. อิทธิพลของความเข้ม และคุณภาพแสง (Light response function) ต่อค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซ

คุณภาพ และความเข้มแสง มีอิทธิพลต่อกระบวนการทางสรีรวิทยา และสัณฐานวิทยาของพืชโดยตรง (Cope and Bugbee, 2013) โดยปกติ ระดับความเข้มของแสงที่เพิ่มขึ้นจากจุดชดเชยแสง (Light compensation point) ไปเรื่อย ๆ นั้น จะทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวของความเข้มแสง (Light saturation point) (Wang et al., 2016; Xiaoying et al., 2012) ซึ่ง ณ จุดนี้การเพิ่มความเข้มแสงจะไม่ส่งผลให้อัตราการสังเคราะห์แสงเพิ่มสูงขึ้นต่อไปอีก เนื่องจากมีปัจจัยอื่น ๆ ที่จำกัดอัตราการสังเคราะห์แสง เช่น ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ การนำไหลของปากใบ และคุณภาพแสง เป็นต้น (Xiaoying et al., 2012) จากการทดลอง พบว่า ค่าอัตราการสังเคราะห์แสง ค่าอัตราการคายระเหยของน้ำ และค่าอัตราการนำไหลของปากใบ เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 37a 37b และ 37c) โดยค่าความชันของเส้นกราฟในช่วงความเข้มแสง $50-200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ของตำรับ 6500 K : 3200 K และ RB มีค่าสูงที่สุดในขณะที่ 6500 K (ภาพที่ 38a 38c และ 38d และตารางที่ 9) มีค่าต่ำสุด เมื่อความเข้มแสงของคุณภาพแสงทั้ง 4 ตำรับเพิ่มขึ้นสูงกว่า $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงในการตรึง CO_2 ลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 39) อาจเนื่องจากปริมาณ CO_2 มีจำกัด จะเห็นได้จากปริมาณ CO_2 ในช่องว่างระหว่างเซลล์ของใบพิทูเนียซึ่งลดต่ำลงในช่วงระดับความเข้มแสง $50 - 150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ และมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มระดับความเข้มแสงตั้งแต่ $200 - 1000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (ภาพที่ 37d) ดังนั้นการปลูกพิทูเนียภายใต้ความเข้มแสงที่สูงกว่า $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ของตำรับ 6500 K : 3200 K และ RB ในสภาวะที่มี CO_2 มีจำกัด อาจก่อให้เกิดความสิ้นเปลืองพลังงานโดยแหล่งกำเนิดแสง LED เนื่องจากความเข้มแสงที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นไม่ได้ถูกใช้ในการสังเคราะห์แสงอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

2. อิทธิพลของคุณภาพแสง และความเข้มแสงต่อการเจริญเติบโตทั้งทางด้านสรีรวิทยา และ สันฐานวิทยา

มีการศึกษาในอดีตที่ผ่านมาที่แสดงให้เห็นว่าความเข้มแสงมีอิทธิพลต่อค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนก๊าซของต้นพิทูเนีย เช่น Haliapas et al (2008) พบว่า เมื่อให้ความเข้มแสง $360 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ด้วยหลอดไฟความดันไอสูง (Hyper Intensity Discharge; HID) พบว่าต้นพิทูเนียมีค่าอัตราการสังเคราะห์แสงสูงกว่าการได้รับความเข้มแสง 40 และ $120 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ซึ่งมีความสอดคล้องกับการทดลองนี้ โดยความเข้มแสง $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ของคุณภาพแสงทั้ง 4 ดำรับ มีค่าอัตราการสังเคราะห์แสงสูงกว่าการได้รับความเข้มแสง $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (ภาพที่ 40a) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงในการตรึง CO_2 ของการได้รับแสงที่ความเข้มชั้น 150 และ $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ไม่มีความแตกต่างกัน (ภาพที่ 39 และตารางที่ 10) ในขณะที่ความเข้มแสงที่ $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ มีอัตราการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนที่สูงกว่าการได้รับแสงที่ความเข้ม $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (ภาพที่ 44c) จึงน่าจะส่งผลให้อัตราการนำพลังงานแสงไปใช้ในการตรึง CO_2 ของใบพิทูเนียที่อยู่ภายใต้ความเข้มแสง $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ เร็วกว่าการได้รับความเข้มแสง $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

อัตราการสังเคราะห์แสงของดำรับ RB ทั้งความเข้มแสง 150 และ $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ มีค่าสูงกว่าดำรับอื่น ๆ ตลอดการทดลอง (ภาพที่ 41a และ 41b) อาจเนื่องจากแสงในดำรับ RB นั้นมีปริมาณแสงสีน้ำเงิน และแดงที่มีช่วงคลื่นตรงกับช่วงคลื่นการดูดกลืนแสงของคลอโรฟิลล์มากที่สุด (ภาพที่ 17 และภาพที่ 18) จากการศึกษาของ Sakhonwasee et al. (2017) พบว่า ต้นพิทูเนียพันธุ์ Purple ที่เจริญเติบโตภายใต้แสง RB มีความหนาแน่นของปากใบสูงซึ่งอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ใบสูง นอกจากนี้ยังมีรายงานอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าแสงที่มีสัดส่วนของสีน้ำเงินมาก ส่งผลให้มีความหนาแน่นของปากใบสูงด้วย และกระตุ้นให้มีการแสดงออกของยีนที่ควบคุมการสังเคราะห์เอนไซม์รูบิสโก (RubisCo) ซึ่งเป็นเอนไซม์สำคัญในกระบวนการตรึง CO_2 เพิ่มมากขึ้น (Wang et al., 2009; Muneer et al., 2014; Juwei et al., 2016; Wang et al., 2016) อีกทั้งแสงสีน้ำเงินยังส่งผลให้ปากใบเปิดกว้างมาก (Frechilla et al., 2000; Talbott et al., 2002) ดังนั้นการตรวจวัดค่าดัชนีในการแลกเปลี่ยนก๊าซของใบที่อยู่ด้านนอกของทรงพุ่มด้วยแสงในดำรับ RB จึงพบว่ามีอัตราการตรึง CO_2 มากกว่าค่าอัตราการสังเคราะห์ที่วัดภายใต้แสงในดำรับอื่น ๆ ในขณะที่ มวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้ง ไม่สอดคล้องกับค่าอัตราการสังเคราะห์แสง โดยดำรับ 3200 K และ 6500 : 3200 K ที่ความเข้มแสง $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ มีค่ามวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งสูงกว่าดำรับ RB อาจเป็นเพราะ แสงในดำรับ RB ซึ่งประกอบด้วยช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงิน (446 nm) และสีแดง (664 nm) (ตารางที่ 2) ที่คลอโรฟิลล์มีความสามารถดูดกลืนได้ดีเป็นพิเศษ (Lichtenthaler and Buschmann, 2001) ส่งผลให้ใบพิทูเนียที่อยู่ด้านนอกทรงพุ่ม

ดูดกลืนแสงสีน้ำเงิน และสีแดงดังกล่าวไว้เกือบทั้งหมด และมีเพียงพลังงานแสงเพียงเล็กน้อยที่จะส่องทะลุเข้าไปในทรงพุ่มได้ ในขณะที่แสงในตำรับ 3200 K และ 6500 K : 3200 K นั้น ซึ่งมีส่วนประกอบของแสงทั้งในช่วงความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงิน เขียว และแดง โดยแสงสีเขียวมีความสามารถในการทะลุผ่านใบด้านนอกของทรงพุ่มได้ดีกว่าแสงสีน้ำเงิน และแดง อีกทั้งใบพืชที่มีความหนาแน่น เนื้อเยื่อใบชั้นในจะได้รับแสงสีเขียวมากกว่าแสงสีน้ำเงิน และแดงอีกด้วย (Sun et al., 1998; Nishio, 2000) ส่งผลให้ใบทั้งหมดที่อยู่ทั้งใน และนอกทรงพุ่มได้รับพลังงานจากแสงสีเขียว ดังนั้นกระบวนการตรึง CO₂ และการเจริญเติบโตโดยรวมของทรงพุ่มก็จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการให้แสงสีเขียวผสมกับแสงสีแดง และน้ำเงิน (Kim et al., 2004; Terashima et al., 2009) นอกจากนี้แสงที่มีส่วนประกอบของแสงแดงไกลยังส่งเสริมการเจริญเติบโตได้มากกว่าแสงที่ไม่มีแสงแดงไกลเป็นส่วนประกอบ (Lee et al., 2016; Bae et al., 2017) ดังนั้น ต้นพิทูเนียในตำรับ 3200 K และ 6500 K : 3200 K ซึ่งมีแสงแดงไกลเป็นส่วนประกอบ จึงมีการเจริญเติบโตมากกว่าต้นที่ปลูกภายใต้แสง RB และมีความคุ้มค่ามากที่สุดในการใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นพิทูเนีย ซึ่งจะเห็นได้จากค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงเพื่อการเจริญเติบโตทางลำต้น และใบ ที่สูงที่สุด (ภาพที่ 47e)

อิทธิพลของคุณภาพแสง ต่อการเจริญเติบโต การออกดอก การให้ผลผลิต และคุณภาพเมล็ดพันธุ์ของต้นพิทูเนีย

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาอิทธิพลของแสงที่มีแสงแดงไกลเป็นส่วนประกอบอยู่มากต่อต้นถั่วเลนทิล 18 ชนิด โดยพบว่าแสงแดงไกลส่งผลให้ลำต้นถั่วยืดยาวทุกชนิด นอกจากนี้ในต้นถั่วบางชนิดมีการเจริญเติบโตสูงขึ้น และให้ผลผลิตเมล็ดถั่วสูงอีกด้วย (Yuan et al., 2017) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ โดยแสงในตำรับ 3200 K นั้น มีแสงแดงไกลเป็นส่วนประกอบมากกว่าแสงในตำรับอื่น ๆ (ภาพที่ 17 และตารางที่ 3) และยังพบความสัมพันธ์ของแสงแดงไกลที่เพิ่มมากขึ้น สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับการขยายของทรงพุ่มที่เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย (ตารางที่ 15) ดังนั้นทรงพุ่มของต้นพิทูเนียที่ได้รับแสงในตำรับ 3200 K จึงมีการขยายความกว้าง และความสูงมากกว่าในตำรับอื่น ๆ (ภาพที่ 49 และ ภาพที่ 50)

แสงที่มีส่วนประกอบของแสงแดงไกล สามารถชักนำให้พืชหลายชนิดออกดอกได้ดีขึ้น เช่น เบญจมาศ (Craig et al., 2013) พิทูเนีย (Kohyama et al., 2014; Park et al., 2016) ถั่วเลนทิล (Yuan et al., 2017) สตรอว์เบอร์รี (Takeda & Glenn, 2008) เป็นต้น จากการทดลองแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของแสงแดงไกลที่เพิ่มมากขึ้นมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับ จำนวนดอก จำนวนฝัก เปอร์เซ็นต์การออกของเรณู จำนวนเมล็ดต่อฝัก และจำนวนเมล็ดต่อต้นที่เพิ่มมากขึ้น (ตารางที่ 14 และตารางที่ 15) ดังนั้น แสงในตำรับ 3200 K ซึ่งมีแสงแดงไกลเป็นส่วนประกอบ

มากกว่าแสงในตำรับอื่น ๆ จึงส่งผลให้ต้นพิทูเนียมีปริมาณการออกดอกต่อวัน (ภาพที่ 54) จำนวนดอก (ภาพที่ 53d) จำนวนฝัก (ภาพที่ 56b) เปอร์เซ็นต์การงอกของเรณู จำนวนเมล็ดต่อฝัก และจำนวนเมล็ดต่อต้นสูงกว่าในตำรับอื่น ๆ (ภาพที่ 57b 57c และ 57d) ในขณะที่ตำรับ RB ซึ่งไม่มีแสงแดงไกลเป็นส่วนประกอบ จะเห็นได้ว่ามีปริมาณการออกดอกต่อวัน และจำนวนดอกต่อต้นต่ำที่สุด (ภาพที่ 53d และภาพที่ 54) และส่งผลต่อจำนวนฝัก (ภาพที่ 56b) และจำนวนเมล็ดต่อต้นที่ต่ำที่สุดอีกด้วย (ภาพที่ 57d) ดังนั้น แสง LED ในตำรับแสงขาวทั้ง 3 ตำรับที่มีส่วนประกอบของแสงแดงไกลมีความสามารถชักนำการติดดอก และผลได้ดีกว่าการใช้แสงในตำรับ RB อย่างไรก็ตาม แสงในตำรับ 3200 K และ 6500 : 3200 K มีความคุ้มค่ามากที่สุดในการใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเพื่อผลิตเมล็ดพันธุ์พิทูเนีย ซึ่งจะเห็นได้จากค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงเพื่อผลิตเมล็ดพันธุ์ที่สูงที่สุด

ผลการทดสอบคุณภาพเมล็ดพิทูเนียที่ผลิตได้จากการทดลองในแต่ละตำรับ แสดงให้เห็นว่าเมล็ดที่ผลิตจากต้นพิทูเนียภายใต้ตำรับแสงที่ต่างกันมีมวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งไม่แตกต่างกัน ในขณะที่เมล็ดพิทูเนียที่ผลิตโดยบริษัท AFM มีมวลน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งสูงกว่าเมล็ดที่ผลิตได้จากการทดลองนี้ทุกตำรับ (ภาพที่ 59) เมื่อนำเมล็ดเมล็ดพิทูเนียที่ได้จากการทดลองของทุกตำรับ และที่ผลิตโดยบริษัท AFM มาทำการเร่งอายุในสภาวะอากาศที่อึดตัวด้วยน้ำ แล้วทำการวัดปริมาณความชื้น พบว่า ความชื้นของเมล็ดจากบริษัท AFM ไม่มีความแตกต่างกับเมล็ดปกติ ในขณะที่เมล็ดที่ได้จากการทดลองของทุกตำรับมีความชื้นในเมล็ดเพิ่มขึ้นจากเมล็ดปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้เมล็ดที่ผลิตโดยบริษัท AFM มีเปอร์เซ็นต์การงอกต่ำ และเวลาที่ใช้ในการงอกที่ยาวนานกว่าเมล็ดที่ได้จากการทดลองของทุกตำรับ (ภาพที่ 60) โดยปกติเมล็ดพิทูเนียมีระยะการพักตัวของเมล็ด โดยส่วนหนึ่งเกิดจากลักษณะทางกายวิภาคของเมล็ดที่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนก๊าซ และน้ำระหว่างภายในกับภายนอกของเมล็ดได้ (Sink, 1984) อาจมีความเป็นไปได้ว่า เมล็ดที่ผลิตโดยบริษัท AFM ภายใต้สภาพโรงเรือนมีขนาด และเปลือกฝัวนอกของเมล็ดที่ใหญ่ และหนากว่าเมล็ดที่ได้จากการทดลองของทุกตำรับ จึงส่งผลให้มีมวลน้ำหนักสด และมวลน้ำหนักแห้งสูง อีกทั้งความหนานี้อาจเป็นเหตุผลให้ความชื้นของเมล็ดทั้งที่ผ่านการเร่งอายุในสภาวะอากาศที่อึดตัวด้วยน้ำ และเมล็ดปกติของบริษัท AFM ไม่มีความแตกต่างกัน เพราะโมเลกุลของน้ำจะซึมผ่านเปลือกฝัวนอกที่มีความหนาได้ยาก และช้ากว่าเปลือกฝัวนอกที่มีความบาง ดังนั้นเมื่อความชื้นไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในเมล็ดได้ง่าย จึงส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ความงอกที่ต่ำ และใช้เวลาในการงอกนาน

สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าหลอดไฟ LED ทุกตัวรับ มีช่วงความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงินที่เหมือนกัน ในขณะที่ช่วงความยาวคลื่นแสงอื่น ๆ จะมีความแตกต่างกันตามอุณหภูมิสีของแสง หรือชนิดของชิปเปล่งแสง นอกจากนี้การผสมแสง LED ที่มีอุณหภูมิสี หรือชิปเปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันสามารถปรับแต่งให้คุณภาพของผลรวมแสงมีการเปลี่ยนแปลงไปได้

การให้ช่วงแสง 16 ชั่วโมงต่อวัน ส่งผลให้ต้นพิทูเนียทั้งในระยะต้นกล้า และระยะออกดอกมีการเจริญเติบโตของ ใบ ดอก และให้ผลผลิตเมล็ด มากที่สุด โดยต้นกล้ามีการเจริญเติบโตเร็ว และมีคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา และสรีรวิทยาที่ดี ส่วนในระยะการสืบพันธุ์สามารถออกดอกได้ไว มีการติดฝัก และเมล็ดต่อต้นสูง

การให้ความเข้มแสง $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ส่งผลให้ต้นพิทูเนียมีประสิทธิภาพในการนำพลังงานแสงไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ดีที่สุด โดยทำให้ค่าอัตราการสังเคราะห์แสงสูงกว่าการได้รับความเข้มแสงที่ต่ำกว่า $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ และเมื่อให้ความเข้มแสงที่สูงกว่า $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ จะทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงในการตรึง CO_2 ลดต่ำลง

ตัวรับ 3200 K และ 6500 K : 3200 K ที่ระดับความเข้มแสง $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ส่งผลให้ต้นพิทูเนียมีการเจริญเติบโตทั้งทางด้านสัณฐานวิทยา และสรีรวิทยาได้ดีกว่าแสงในตัวรับอื่นๆ อย่างไรก็ตาม แสงในตัวรับ 3200 K จะมีลักษณะทรงพุ่มที่ยืดขยายกว่าแสงในตัวรับ 6500 K : 3200 K ซึ่งลักษณะยืดยาวของทรงพุ่มดังกล่าวส่งผลให้การจัดการในระบบปลูกมีความยากต่อการเคลื่อนย้าย ดังนั้นการใช้แสงตัวรับ 6500 K : 3200 K จึงมีความเหมาะสมในการใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเพื่อปลูกต้นพิทูเนีย

ตัวรับ 3200 K และ 6500 K : 3200 K ที่ระดับความเข้มแสง $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความคุ้มค่ามากที่สุดในการใช้พลังงานแสงเพื่อการเจริญเติบโต การออกดอก การติดฝัก และผลผลิตเมล็ดพันธุ์ต่อต้นสูง และเมล็ดยังมีคุณภาพที่สูงกว่าตัวรับอื่นๆ อย่างไรก็ตาม เมล็ดจากต้นพิทูเนียที่ปลูกภายใต้แสงไฟในตัวรับ 6500 K : 3200 K มีเปอร์เซ็นต์ความงอก และความแข็งแรงของเมล็ดสูงที่สุด

ข้อเสนอแนะ

การทดลองในครั้งนี้มุ่งเน้นในการศึกษาอิทธิพลของแสงจากหลอดแอลอีดีต่อการเจริญเติบโต และการผลิตเมล็ดพันธุ์ของต้นพิทูเนียในระบบกึ่งปิด ซึ่งข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นพิทูเนีย และผลผลิตเมล็ดพันธุ์ที่ได้นั้น ไม่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการเจริญเติบโตของต้นพิทูเนีย และผลผลิต

เมล็ดพันธุ์ที่อยู่ในสภาวะการปลูกในโรงเรือนแบบดั้งเดิม จึงยังไม่สามารถวิเคราะห์การแตกต่างของระบบปลูกทั้งสองรูปแบบได้อย่างชัดเจน ดังนั้น ควรศึกษาเปรียบเทียบการเจริญเติบโต และการผลิตเมล็ดพันธุ์ของต้นพืชนียในระบบกึ่งปิด และในสภาวะปลูกในโรงเรือนแบบดั้งเดิม เพื่อให้เห็นความแตกต่างกันอย่างชัดเจนยิ่งขึ้นต่อไป



บรรณานุกรม

- ชวนพิศ แต่งสวัสดิ์. 2544. สรีรวิทยาของพืช. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: พัฒนาศึกษา.
- นันทิยา สมานนท์. 2535. คู่มือการปลูกไม้ดอก. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ และ ปรีชา สุวรรณพินิจ. 2554. จุลชีววิทยาทั่วไป. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ราชบัณฑิตยสถาน. 2541. ศัพท์พจนานุกรม อังกฤษ-ไทย ฉบับราชบัณฑิตยสถาน. กรุงเทพฯ: อรุณการพิมพ์.
- ลิลลี่ กาวีตะ. 2546. การเปลี่ยนแปลงทางสัณฐาน และพัฒนาการของพืช. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วันเพ็ญ ภูติจันทร์. 2547. พจนานุกรม. กรุงเทพฯ: โอ เอส.พรินต์ติ้ง เฮาส์.
- วรรณุช แจงสว่าง. 2553. พลังงานหมุนเวียน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: แอคทีฟ พรินท์.
- สมาคมเมล็ดพันธุ์แห่งประเทศไทย. 2550. ข่าวสารเมล็ดพันธุ์พืช. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://seed.or.th/documents/seedmags/july&august07.pdf> (23 พฤศจิกายน 2558).
- สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์. 2548ก. ชีววิทยาพืช. กรุงเทพฯ: จามจุรีโปรดักท์.
- _____. 2548ข. สรีรวิทยาของพืช. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: จามจุรีโปรดักท์.
- สมเพียร เกษมทรัพย์. 2526. ไม้ดอกกระถาง. กรุงเทพฯ: อักษรพิทยา.
- สัมฤทธิ์ เฟื่องจันทร์. 2544. สรีรวิทยาการพัฒนากาพืช. กรุงเทพฯ: คลังนาวิทยา.
- อรรคเดช ศรีบุตตะ และ พิชรี แสนจันทร์. 2554. การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกและแนวโน้มในอนาคต. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 12, 60-64.
- Adams, S. R., Pearson, S., Hadley, P., & Patefield, W. M. 1999. The effects of temperature and light integral on the phases of photoperiod sensitivity in *Petunia hybrida*. *Annals of Botany*, 83, (3), 263-269.
- Akbarian, B., Matloobi, M., & Mahna, N. 2016. Effects of LED Light on Seed Emergence and Seedling Quality of Four Bedding Flowers. *Journal of Ornamental & Horticultural Plants*, 6, (2), 115-123.
- Aphalo, P. J. 2006. Light signals and the growth and development of plants—a gentle introduction. *The plant photobiology notes*, 1, 39.

- Bae, J. H., Park, S. Y. & Oh, M. M. 2017. Supplemental Irradiation with Far-red Light-emitting Diodes Improves Growth and Phenolic Contents in *Crepidiastrum denticulatum* in a Plant Factory with Artificial Lighting. *Hortic. Environ. Biotechnol*, 58, (4), 357-366.
- Blanchard, M. G., Runkle, E. S., & Fisher, P. R. 2011. Modeling plant morphology and development of petunia in response to temperature and photosynthetic daily light integral. *Scientia horticultruae*, 129, (2), 313-320.
- Borthwick, H. A., Hendricks, S. B., Parker, M. W., Toole, E. H., & Toole, V. K. 1952. A reversible photoreaction controlling seed germination. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 38, (8), 662-666.
- Bourget, C. M. 2008. An introduction to light-emitting diodes. *HortScience*, 43, (7), 1944-1946.
- Brewbaker, J.L. & Kwack B.H. 1963. The essential role of calcium ion in pollen germination and pollen tube growth. *Amer.Jour.Bot*, 50, (9), 859-865.
- Burdett, A. N. 1972. Two effects of prolonged far red light on the response of lettuce seeds to exogenous gibberellin. *Plant physiology*, 49, (4), 531-534.
- Calic, D. Devrnja, N. Kostic, I. & M. Kostic. 2013. Pollen morphology, viability, and germination of *Prunus domestica* cv. Pozega ca. *Scientia Horticulturuae*, 155, 118-122.
- Chang, M. H., Das, D., Varde, P. V., & Pecht, M. 2012. Light emitting diodes reliability review. *Microelectronics Reliability*, 52, (5), 762-782.
- Cope, K. R., & Bugbee, B. 2013. Spectral effects of three types of white light-emitting diodes on plant growth and development: absolute versus relative amounts of blue light. *HortScience*, 48, (4), 504-509.
- Craig, D. S., & Runkle, E. S. 2013. A moderate to high red to far-red light ratio from light-emitting diodes controls flowering of short-day plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 138, (3), 167-172.
- DenBaars, S. P., Feezell, D., Kelchner, K., Pimputkar, S., Pan, C. C., Yen, C. C., ... & Iza, M. 2013. Development of gallium-nitride-based light-emitting diodes (LEDs) and laser diodes for energy-efficient lighting and displays. *Acta Materialia*, 61, (3), 945-951.

- Demir, I., Ermis, S., Mavi, K., & Matthews, S. 2008. Mean germination time of pepper seed lots (*Capsicum annuum* L.) predicts size and uniformity of seedlings in germination tests and transplant modules. *Seed Science and Technology*, 36, (1), 21-30.
- Dong, C., Shao, L., Fu, Y., Wang, M., Xie, B., Yu, J., & Liu, H. 2015. Evaluation of wheat growth, morphological characteristics, biomass yield and quality in Lunar Palace-1, plant factory, green house and field systems. *Acta astronautica*, 111, 102-109.
- Downs, R. J., & Thomas, J. F. 1982. Phytochrome regulation of flowering in the long-day plant, *Hyoscyamus niger*. *Plant physiology*, 70, (3), 898-900.
- Epstein, E., & Bloom, A. J. 2005. *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives*. 2nd ed. Sunderland: Sinauer Associates.
- Fan, X. X., Xu, Z. G., Liu, X. Y., Tang, C. M., Wang, L. W., & Han, X. L. 2013. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Scientia Horticulturae*, 153, 50-55.
- Faust, J. E., Holcombe, V., Rajapakse, N. C., & Layne, D. R. 2005. The effect of daily light integral on bedding plant growth and flowering. *HortScience*, 40, (3), 645-649.
- Frechilla, S., Talbott, L. D., Bogomolni, R. A., & Zeiger, E. 2000. Reversal of blue light-stimulated stomatal opening by green light. *Plant and Cell Physiology*, 41, (2), 171-176.
- Fukuda, N., Ishii, Y., Ezura, H., & Olsen, J. E. 2009. Effects of light quality under red and blue light emitting diodes on growth and expression of FBP28 in *Petunia*. pp. 361-366. In *VI International Symposium on Light in Horticulture*, 907.
- Fukuda, N. 2013. Advanced light control technologies in protected horticulture: A review of morphological and physiological responses in plants to light quality and its application. *Journal of Developments in Sustainable Agriculture*, 8, (1), 32-40.

- Fukuda, N., Ajima, C., Yukawa, T., & Olsen, J. E. 2016. Antagonistic action of blue and red light on shoot elongation in petunia depends on gibberellin, but the effects on flowering are not generally linked to gibberellin. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 102-111.
- Gautam, P., Terfa, M. T., Olsen, J. E., & Torre, S. 2015. Red and blue light effects on morphology and flowering of *Petunia hybrida*. *Scientia Horticulturae*, 184, 171-178.
- Gunn, C. R. 1974. *Seed characteristics of 42 economically important species of Solanaceae in the United States (No. 1471)*. Maryland: US Department of Agriculture.
- Gupta, S. D., & Jatothu, B. 2013. Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in in vitro plant growth and morphogenesis. *Plant Biotechnology Reports*, 7, (3), 211-220.
- Haliapas, S., Yupsanis, T. A., Syros, T. D., Kofidis, G., & Economou, A. S. 2008. *Petunia hybrida* during transition to flowering as affected by light intensity and quality treatments. *Acta Physiologiae Plantarum*, 30, (6), 807.
- Haque, M. S., Kjaer, K. H., Rosenqvist, E., & Ottosen, C. O. 2015. Continuous light increases growth, daily carbon gain, antioxidants, and alters carbohydrate metabolism in a cultivated and a wild tomato species. *Frontiers in plant science*, 6, 1-11.
- Hiscox, J. T., & Israelstam, G. F. 1979. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian journal of botany*, 57, (12), 1332-1334.
- Hong, C. H., Kwon, S.L., Kim, K.K., Chae, M.J., Jung, G.B., & So, K. S. (2013). Flowering control by using red light of *Chrysanthemum*. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 32, (2), 123-127.
- ITO, H., & Saito, T. 1962. Studies on the flower formation in the strawberry plants. *Tohoku journal of agricultural research*, 13, 191-203.
- Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hashida, S. N., & Yoshihara, T. 2010. Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *HortScience*, 45, (12), 1809-1814.

- Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hahida, S. N., & Yoshihara, T. 2012. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environmental and Experimental Botany*, 75, 128-133.
- Juwei, H. U., Xin, D. A. I., & Guangyu, S. U. N. 2016. Morphological and Physiological Responses of *Morus alba* Seedlings under Different Light Qualities. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 44, (2), 382-392.
- Kasai, M. 2008. Effect of growing soybean plants under continuous light on leaf photosynthetic rate and other characteristics concerning biomass production. *J. Agron*, 7, 156-162.
- Kami, C., Lorrain, S., Hornitschek, P., & Fankhauser, C. 2010. Chapter two-light-regulated plant growth and development. *Current topics in developmental biology*, 91, 29-66.
- Kapyla, M. 1991. Testing the age and viability of airborne pollen. *Grana*, 30(2), 430-433.
- Kim, H. H., Goins, G. D., Wheeler, R. M., & Sager, J. C. 2004. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red-and blue-light-emitting diodes. *HortScience*, 39, (7), 1617-1622.
- Kohyama, F., Whitman, C., & Runkle, E. S. 2014. Comparing flowering responses of long-day plants under incandescent and two commercial light-emitting diode lamps. *HortTechnology*, 24, (4), 490-495.
- Kozai, T. 2007. Propagation, grafting and transplant production in closed systems with artificial lighting for commercialization in Japan. *Propagation of Ornamental Plants*, 7, (3), 145-149.
- Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (Eds.). 2015. *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. London: Academic Press.
- Lee, M. J., Son, K. H. & Oh, M. M. 2016. Increase in Biomass and Bioactive Compounds in Lettuce under Various Ratios of Red to Far-red LED Light Supplemented with Blue LED Light. *Hortic. Environ. Biotechnol*, 57, (2), 139-147.

- Lefsrud, M. G., Kopsell, D. A., Augé, R. M., & Both, A. J. 2006. Biomass production and pigment accumulation in kale grown under increasing photoperiods. *HortScience*, 41, (3), 603-606.
- Lichtenthaler, H. K., & Buschmann, C. 2001. Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. pp. 4.3.1-F4.3.8. In Wrolstad, R. E., Acree, T. E., An, H., Decker, E. A., Penner, M. H., Reid, D. S., Schwartz, S. J., Shoemaker, C. F. and Sporns, P. (Eds.). **Current Protocols in Food Analytical Chemistry (CPFA)**. New York: John Wiley and Sons.
- Lin, K. H., Huang, M. Y., Huang, W. D., Hsu, M. H., Yang, Z. W., & Yang, C. M. 2013. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata). *Scientia Horticulturae*, 150, 86-91.
- Liu, Z., Liu, S., Wang, K., & Luo, X. 2009. Status and prospects for phosphor-based white LED packaging. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2, (2), 119-140.
- Ma, X., Song, L., Yu, W., Hu, Y., Liu, Y., Wu, J., & Ying, Y. 2015. Growth, physiological, and biochemical responses of *Camptotheca acuminata* seedlings to different light environments. *Frontiers in plant science*, 6, 2-11.
- Matsuda, R., Ozawa, N., & Fujiwara, K. 2014. Leaf photosynthesis, plant growth, and carbohydrate accumulation of tomato under different photoperiods and diurnal temperature differences. *Scientia Horticulturae*, 170, 150-158.
- McDonald, M. B. & Kwong, F. Y. 2005. **Flower seeds: biology and technology**. Columbus, Ohio: Department of Horticulture and Crop Science, Ohio State University.
- Muneer, S., Kim, E. J., Park, J. S., & Lee, J. H. 2014. Influence of green, red and blue light emitting diodes on multiprotein complex proteins and photosynthetic activity under different light intensities in lettuce leaves (*Lactuca sativa* L.). *International journal of molecular sciences*, 15, (3), 4657-4670.

- Murage, E. N., Watashiro, N., & Masuda, M. 1996. Leaf chlorosis and carbon metabolism of eggplant in response to continuous light and carbon dioxide. *Scientia horticulturae*, 67, (1-2), 27-37.
- Nelson, J. A., & Bugbee, B. 2014. Economic analysis of greenhouse lighting: light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures. *PLoS One*, 9, (6), e99010.
- Nhut, D. T., Takamura, T., Watanabe, H., Okamoto, K., & Tanaka, M. 2003. Responses of strawberry plantlets cultured in vitro under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 73, (1), 43-52.
- Nishio, J. N. 2000. Why are higher plants green? Evolution of the higher plant photosynthetic pigment complement. *Plant, Cell & Environment*, 23, (6), 539-548.
- Park, I. S., Cho, K. J., Kim, J., Cho, J. Y., Lim, T. J., & Oh, W. 2016. Growth and flowering responses of petunia to various artificial light sources with different light qualities. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 34, (1), 55-66.
- Peri, P. L., Pastur, G. M., & Lencinas, M. V. 2009. Photosynthetic response to different light intensities and water status of two main *Nothofagus* species of southern Patagonian forest, **Argentina**. *J. For. Sci*, 55, 101-111.
- Piskurewicz, U., Tureckva, V., Lacombe, E., and Lopez-Molina, L., 2009. Far-red light inhibits germination through DELLA-dependent stimulation of ABA synthesis and ABI3 activity. *The EMBO Journal*, 28, 2259–2271.
- Rakic, T., Gajić, G., Lazarević, M., & Stevanović, B. 2015. Effects of different light intensities, CO₂ concentrations, temperatures and drought stress on photosynthetic activity in two paleoendemic resurrection plant species *Ramonda serbica* and *R. nathaliae*. *Environmental and experimental botany*, 109, 63-72.
- Rijkema, A., Gerats, T., & Vandenbussche, M. 2006. Genetics of floral development in *Petunia*. *Advances in botanical research*, 44, 237-278.
- Rodo, A. B., & Marcos-Filho, J. 2003. Onion seed vigor in relation to plant growth and yield. *Horticultura Brasileira*, 21, (2), 220-226.

- Sakhonwasee, S., Tummachai, K., & Nimnoy, N. 2017. Influences of LED Light Quality and Intensity on Stomatal Behavior of Three Petunia Cultivars Grown in a Semi-closed System. *Environmental Control in Biology*, 55, (2), 93-103.
- Shen, Y. Z., Guo, S. S., Ai, W. D., & Tang, Y. K. 2014. Effects of illuminants and illumination time on lettuce growth, yield and nutritional quality in a controlled environment. *Life Sciences in Space Research*, 2, 38-42.
- Shimizu, H., Saito, Y., Nakashima, H., Miyasaka, J., & Ohdoi, K. 2011. Light environment optimization for lettuce growth in plant factory. *IFAC Proceedings Volumes*, 44, (1), 605-609.
- Shimokawa, A., Tonooka, Y., Matsumoto, M., Ara, H., Suzuki, H., Yamauchi, N., & Shigyo, M. 2014. Effect of alternating red and blue light irradiation generated by light emitting diodes on the growth of leaf lettuce. *bioRxiv*, 003103.
- Singh, D., Basu, C., Meinhardt-Wollweber, M., & Roth, B. 2015. LEDs for energy efficient greenhouse lighting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 139-147.
- Sink, K.C. 1984. *Petunia*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Sullivan, J. A., & Deng, X. W. 2003. From seed to seed: the role of photoreceptors in Arabidopsis development. *Developmental biology*, 260, (2), 289-297.
- Sun, J., Nishio, J. N., & Vogelmann, T. C. 1998. Green light drives CO₂ fixation deep within leaves. *Plant and Cell Physiology*, 39, (10), 1020-1026.
- Takeda, F., Glenn, D. M., & Stutte, G. W. 2008. Red light affects flowering under long days in a short-day strawberry cultivar. *HortScience*, 43, (7), 2245-2247.
- Talbott, L. D., Nikolova, G., Ortiz, A., Shmayevich, I., & Zeiger, E. (2002). Green light reversal of blue-light-stimulated stomatal opening is found in a diversity of plant species. *American Journal of Botany*, 89, (2), 366-368.
- Terashima, I., Fujita, T., Inoue, T., Chow, W. S., & Oguchi, R. 2009. Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: revisiting the enigmatic question of why leaves are green. *Plant and cell physiology*, 50, (4), 684-697.

- Ubukawa, M., Fukuda, N., Oyama-Okubo, N., Koshioka, M., Mander, L. N., Sase, S., & Nishimura, S. 2004. Effect of light source and quality on endogenous gibberellin level and GA3 response of petunia (*Petunia hybrida* Vilm.). *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 73, (5), 441-446.
- Van, T. K., Haller, W. T., Bowes, G., & Garrard, L. A. 1977. Effects of light quality on growth and chlorophyll composition in *Hydrilla*. *J. Aquat. Plant Manage*, 15, 29-31.
- Vanninen, I., Pinto, D. M., Nissinen, A. I., Johansen, N. S., & Shipp, L. 2010. In the light of new greenhouse technologies: 1. Plant-mediated effects of artificial lighting on arthropods and tritrophic interactions. *Annals of applied biology*, 157, (3), 393-414.
- Velikova V., & Loreto, F. 2005. On the relationship between isoprene emission and thermotolerance in *Phragmites australis* leaves exposed to high temperatures and during the recovery from a heat stress. *Plant, Cell & Environment*, 28, 318-327.
- Wang, H., Gu, M., Cui, J., Shi, K., Zhou, Y., & Yu, J. 2009. Effects of light quality on CO₂ assimilation, chlorophyll-fluorescence quenching, expression of Calvin cycle genes and carbohydrate accumulation in *Cucumis sativus*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 96, (1), 30-37.
- Wang, X. Y., Xu, X. M., & Cui, J. 2015. The importance of blue light for leaf area expansion, development of photosynthetic apparatus, and chloroplast ultrastructure of *Cucumis sativus* grown under weak light. *Photosynthetica*, 53, (2), 213-222.
- Wang, J., Lu, W., Tong, Y., & Yang, Q. 2016. Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light. *Frontiers in plant science*, 7, 1-10.

- Xiaoying, L., Shirong, G., Taotao, C., Zhigang, X., & Tezuka, T. 2012. Regulation of the growth and photosynthesis of cherry tomato seedlings by different light irradianations of light emitting diodes (LED). *African Journal of Biotechnology*, 11, (22), 6169-6177.
- Yeh, N., & Chung, J. P. 2009. High-brightness LEDs—Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 8), 2175-2180.
- Yorio, N. C., Goins, G. D., Kagie, H. R., Wheeler, R. M., & Sager, J. C. 2001. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. *HortScience*, 36, (2), 380-383.
- Yuan, H. Y., Saha, S., Vandenberg, A., & Bett, K. E. 2017. Flowering and Growth Responses of Cultivated Lentil and Wild Lens Germplasm toward the Differences in Red to Far-Red Ratio and Photosynthetically Active Radiation. *Frontiers in plant science*, 8, 1-10.
- Zhang, F. Q., Wang, Y. S., Lou, Z. P., & Dong, J. D. 2007. Effect of heavy metal stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorhiza*). *Chemosphere*, 67, (1), 44-50.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ประวัติผู้วิจัย

ประวัตินักศึกษา

ชื่อ-สกุล นายทิวา จามะรี
เกิดเมื่อ 30 มกราคม 2534
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2553-2557 ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ
จังหวัดแพร่
พ.ศ. 2550-2553 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนประชามงคล
จังหวัดกาญจนบุรี
อีเมล Va_advanced@hotmail.co.th

